

Zur Geschichte der militärischen Radaranwendungen in der Schweiz Beschaffung des Tiefflieger Radar Prototyp Systems TAFLIR Hans H. Jucker, Zielackerstrasse 7, 8603 Schwerzenbach

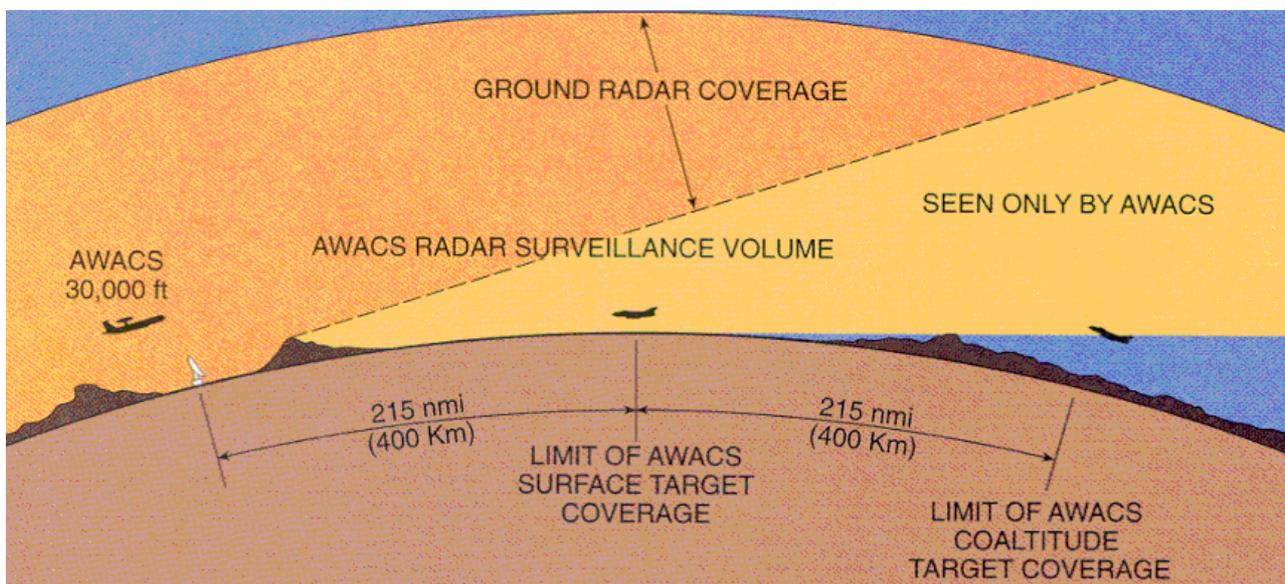
Die beteiligten Firmen welche sich im Rahmen der Evaluation mit ihren Systemen an der Erprobung in Schweiz beteiligt hatten, reagierten unterschiedlich auf die Aufforderung der GRD, nach verbesserten Lösungen zu suchen.

Die **Firma Selenia** verzichtete auf eine weitere Beteiligung am Wettbewerb um das schweizerische Tiefflieger Radarsystem (abgekürzt **TAFLIR – Radarsystem**), da sie offenbar ausserstande war innert der anberaumten Frist an ihrem RAT31S System die erforderlichen Verbesserungen und Anpassungen durchzuführen.

Die beiden **Firmen Hughes und Westinghouse** zeigten hingegen nach wie vor grosses Interesse am Projekt ⁽¹⁾. Gemäss ihren Stellungnahmen erklärten sich beide Firmen bereit bis Herbst 1981 ein Angebot für ein neues System zu unterbreiten, das die Anforderungen des schweizerische TAFLIR - Radarsystems erfüllen sollte. Die **Firma Hughes** welche mit ihrem sehr flexiblen AN/TPQ-37 System bei den Versuchen die radartechnischen Anforderungen bereits weitgehend erfüllte, musste im Angebot neben einer Reihe von Helvetisierungen und Verbesserungen an der operationellen Software auch eine Lösung für den bisher noch fehlenden Rundsuchmodus präsentieren.

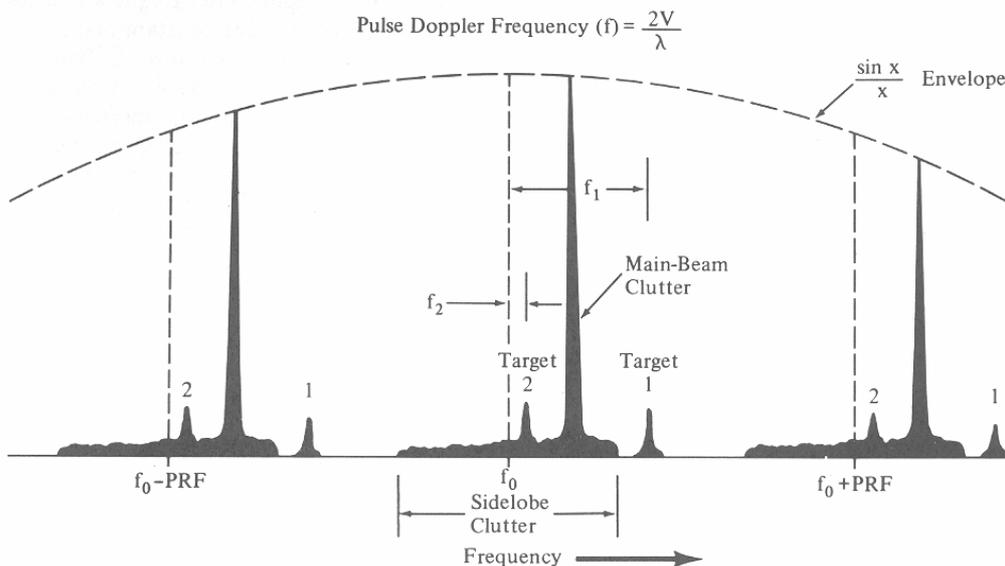
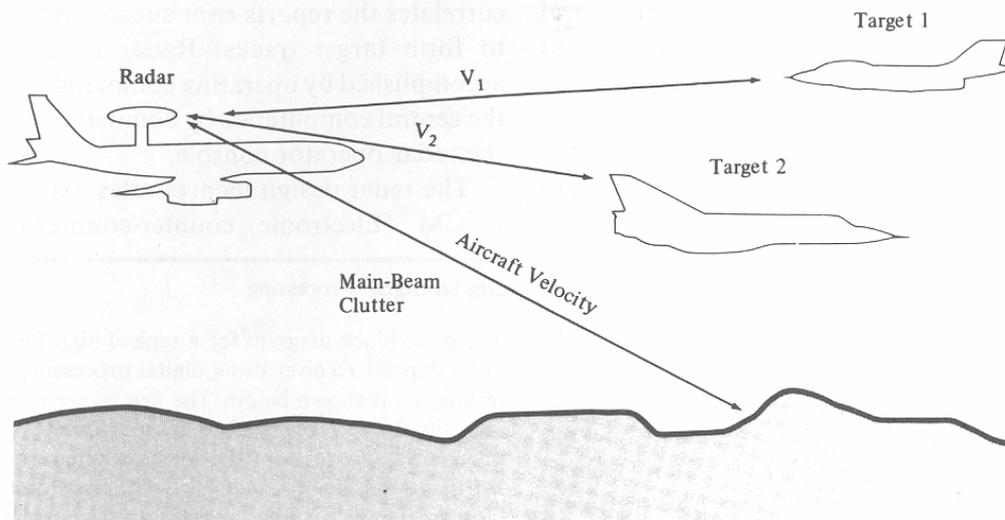
Das AN/TPS-43 System hingegen hatte die radartechnischen Anforderungen nicht erfüllt, die **Firma Westinghouse** war daher gezwungen, auch gemäss ihrer eigenen Einschätzung, mit dem Angebot eine grundsätzlich neue Lösung zu präsentieren.

In den frühen siebziger Jahren standen die beiden Firmen in einem erbitterten Konkurrenzkampf bei der Entwicklung eines Radarsystems für das von der US Air Force (**USAF**) geplante strategische „**Airborne Warning And Control System**“ (**AWACS**). Die USAF hatte im Juli 1970, das **Flugzeug Boeing 707** als Träger für das AWACS Radarsystem bestimmt und der Firma Boeing in Seattle den Auftrag als Generalunternehmer für das Gesamtprojekt erteilt. Die Firmen Hughes und Westinghouse konkurrierten im Unterauftrag von Boeing für die Lieferung eines geeigneten Radarsystems, das die Anforderungen für den „**downlooking**“ Einsatz über grosse Entfernungen erfüllte. **Gemäss Pflichtenheft musste das auf einer Flughöhe von 10'000 Meter operierende AWACS – Flugzeug in der Lage sein tief fliegende Flugzeuge sowie Seeziele bis zu Entfernungen von 400 km und die über dem AWACS Radarhorizont fliegenden Flugzeuge bis 800 km zu erfassen.** Die nachstehende Figur zeigt den Vergleich der vom AWACS System geforderten Radarüberdeckung gegenüber einer am Boden installierten Radaranlage.



Als Sieger im Konkurrenzverfahren ging Westinghouse hervor und zwar mit einem Puls Doppler Radarsystem das mit einer neuartigen Radarantenne arbeitete welche einen sehr hohem Hauptkeulen/Seitenkeulen Abstand aufwies. Dank dem Puls Doppler Verfahren und der sog. „**Ultra Low Sidelobe Antenna**“ (**ULSA**) konnten die Zielechos von tief fliegende Flugzeugen und Seezielen, welche wie dies aus den dargestellten Figuren hervorgeht zwangsläufig in Boden- oder See- Clutter eingebettet sind, vom Radar des AWACS Flugzeuges erfasst und herausgefiltert werden.

Westinghouse hatte bei den Messungen im Rahmen des AWACS Testprogrammes festgestellt, dass das Verhältnis der vom Mainbeam der Antenne erfassten Zielechos von tief fliegenden Flugzeugen oder Seezielen, zum Boden- oder Seeclutter in der Grössenordnung von 40 – 50 dB liegt. Die nachstehende Figur zeigt die Dopplerspektren von an- und wegfliedenden Flugzeugen sowie die Dopplerspektren des von der Hauptkeule und den Nebenkeulen der Antenne erfassten Bodenclutters. Für die Detektion von Flugzielen im Bodenclutter ist es von ausschlaggebender Bedeutung, dass das Radar möglichst wenig Bodenclutter über die Seitenkeulen der Antenne erfasst.

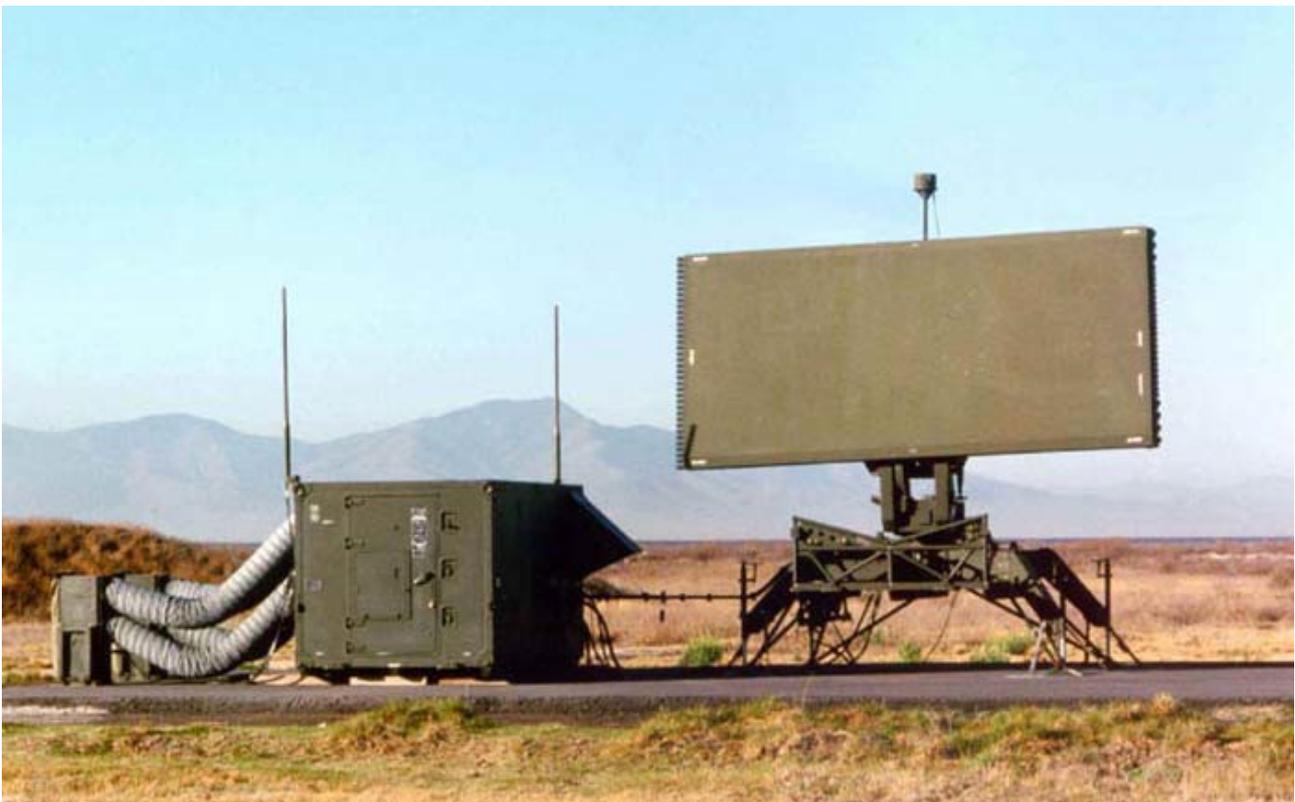


- Westinghouse hatte auch in der Schweiz im Rahmen der Tiefflieger Radar Erprobung Messungen durchgeführt und bei der anschliessender Analyse festgestellt, dass es sich um Bodenclutter Situationen handelte, welche mit denjenigen der AWACS Radars vergleichbar sind.
- Bei der Entwicklung der ersten Pulsdoppler Radars in den 60er Jahren hatte Westinghouse erfahren, dass die Unstabilitäten in der Signalerzeugung des Radars ein erstrangiger Verursacher von Degradationen bei der Dopplerfilterung von Zielechos aus dem Bodenclutter sind. Westinghouse hatte daher erkannt, dass für Zielsignal/Cluttersignal Verhältnisse von 40 – 50 dB, zum vornherein nur vollkohärente Radarsysteme mit einer Gesamtstabilität in der Grössenordnung von 50 dB und mehr in Frage kommen.

Westinghouse ging davon aus, dass sich mit dem „know how“ und den technischen Massnahmen welche zur erfolgreichen Entwicklung des AWACS Radars geführt hatten, sich auch eine Lösung für die Entwicklung eines schweizerischen Tiefflieger Radarsystems erarbeiten liess !

Als Lösung für das schweizerische Tiefflieger Radarsystem sah Westinghouse den Einsatz eines **Pulsdoppler Radarsystems mit mittlerer PRF und einem eindeutigen Entfernungsbereich** in Kombination mit einer „**Ultra Low Sidelobe Antenna**“ (ULSA) welche auf Grund ihrer neuartigen Konstruktion den Empfang von Clutter über die Seitenkeulen weitgehend vermied. Um über Gebieten mit Standzeichen eine zuverlässige Höhenvermessung zu gewährleisten, erachtete es Westinghouse zudem als notwendig eine Dopplerfilterung für sämtliche Empfangskanäle vorzusehen.

In Fachkreisen hatte der Erfolg von Westinghouse im Konkurrenzverfahren um das E-3A AWACS Radar Programm von Boeing grosse Beachtung gefunden. Westinghouse erhielt kurz darauf vom **Rome Air Development Center der USAF** den Entwicklungsauftrag für eine „**Ultra Low Sidelobe Antenna**“ für das AN/TPS-43 Radarsystem(siehe Foto).



Bei der ULSA Array für das AN/TPS-43 ULSA Radarsystem wurde analog wie schon bei der ursprünglichen parabolischen Antenne des AN/TPS-43E die sendeseitige Ausleuchtung des Elevationsbereiches durch einen „fan shaped beam“ mit cosecant² Strahlungscharakteristik beibehalten, empfangsseitig wurde der Elevationsbereich ebenfalls in sechs „stacked beams“ aufgeteilt welche eine simultanen Verarbeitung in sechs Kanälen ermöglichte.

Westinghouse Studie für ein Projekt TAFLIR vom 29 August 1980.

Westinghouse orientierte bereits im Herbst 1980 über eine inzwischen durchgeführte Studie für einen, gegenüber dem bei der Erprobung in der Schweiz verwendeten AN/TPS 43E Radar weitgehend geänderten Systemsentwurf. Obschon das neue mit einer **ULSA -Antenne** ausgerüstete System die sendeseitige Ausleuchtung des Elevationsbereiches durch einen „fan shaped beam“ mit cosecant² Strahlungscharakteristik beibehält, so erfolgte empfangsseitig die Verarbeitung der Signale aus dem in sieben „stacked beams“ unterteilten Elevationsbereichs mit einem **Pulsdoppler System**.

Das neue System sollte vor allem in der Lage sein die bei der Radarerfassung von Flugzeugen im schweizerischen Voralpen- und Alpengebiet auftretenden Bodenclutter Probleme zu bewältigen. Die Analyse der Standortversuche hatte Westinghouse gezeigt, dass der Bodenclutter im Radarbeam 2 oftmals stärker war als im Radarbeam 1. Um Flugzeuge in einem höheren Beam erfassen zu können musste darum auch der Bodenclutter im darunter liegenden Beam mit einer wirksamen Dopplerfilterung ausgeschieden werden. Die Feldversuche in der Schweiz hatten weiter gezeigt, dass bei der Erfassung von Flugzeugen welche auf Höhen von 7000 Meter in den Beam 5 oder Beam 6 des Radars flogen, Beeinträchtigungen durch Bodenclutter aufgetreten waren. Mit der Dopplerfilterung in sämtlichen Empfangs Kanälen sollte nun diese Beeinträchtigung vermieden werden. Das neue Radar verfügte über zwei unterschiedliche Betriebsarten um die Echos von Flugzeugen sowohl in Gebieten mit Bodenclutter wie auch in Gebieten mit windgetriebenen Regen- oder „Chaff“ - Clutter, erfolgreich erfassen zu können:

- **Im Pulse Agile Mode (PAM) der Doppler Filter Bank sendet das Radar eine Gruppe von zufällig ausgewählten („pseudorandom“) Frequenzen aus, wobei die gleiche Frequenz viermal innerhalb einer Gruppe von 16 ausgesendet wird. Die Radarechos von den vier gleichen Frequenzen werden kombiniert und durchlaufen bei der Auswertung vier verschiedene Doppler Filter. In Regionen mit Bodenclutter bewirkt eine Clutter Map, dass der Filter 1 welcher die niedrigsten Dopplerfrequenzen und damit den Bodenclutter enthält, ausgetastet wird. Der Pulse Agile Mode entspricht im Prinzip einem 4 Pulse MTI mit 4 unterschiedlichen Interpuls Perioden und vermeidet dadurch weitgehend das Problem mit den Blindgeschwindigkeiten der herkömmlichen MTI Systeme. Der Pulse Agile Mode ist infolge der zufällig ausgewählten Radarfrequenzen auch im elektronisch gestörten Klima eine optimale Betriebsart.**

- **Im Burst Agile Mode (BAM) der Doppler Filter Bank sendet das Radar vier Gruppen von 9 gleichen Radarfrequenzen und gleichen Interpulse Perioden aus. Mit jeder neuen Gruppe ändert jedoch die Radarfrequenz und die Interpulse Periode. Die Radarechos durchlaufen 8 verschiedene Dopplerfilter. In Regionen mit Bodenclutter bewirkt eine Clutter Map, dass nur 6 der 8 Filter aktiv sind wodurch die niedrigsten Dopplerfrequenzen und damit der Bodenclutter ausgetastet wird. Der Burst Agile Mode ist speziell geeignet für das Ausfiltern von Clutter welcher durch windgetriebenen Regen oder passive „Chaff“ Störungen verursacht wird.**

Westinghouse ging von der Annahme aus, dass mit dem neuen Pulse Agile Mode das Erfassen von Flugzeugen über Gebieten mit Bodenclutter gegenüber dem AN/TPS43E System wie folgt verbessert werden kann:

	Gewinn
<input type="checkbox"/> Verbesserung des MTI Improvement Factors auf 46 dB	13 dB
<input type="checkbox"/> Verbesserung durch I und Q Verarbeitung	5 dB
Resultierender Gewinn bei der Ausfilterung von Bodenclutter	18 dB

Alle diese Verbesserungen setzen jedoch voraus, dass die kritischen Systemparameter die nachfolgenden Anforderungen erfüllen:

- Radar Sendeleistung** **1'200 kW**
- Radar Stabilität** **50 dB**
- Radarempfänger Bandbreite** **2.4 MHz**
- Radarempfänger Dynamik** **100 dB**
- Analog/Digital Umwandlung** **12 Bit**
- Treffer pro Beamwidth** **7.6 - 9**

Das neue TAFLIR Tiefflieger Radarsystem sollte gemäss dem Westinghouse Vorschlag vom Herbst 1980 in der Lage sein Flugzeuge mit 1 m² Reflexionsquerschnitt mit 80% Wahrscheinlichkeit über einem Bodenclutter Gebiet mit einem mittleren Reflexionsquerschnitt von 43.8 dBm² zu erfassen.

Bei den Erprobungen des AN/TPS-43E Systems auf den verschiedenen Standorten wurden auch grosse Probleme bei der Höhenvermessung der erfassten Flugzeuge festgestellt. Durch die vorgesehene Ausdehnung der Dopplerfilterung auf sämtliche 7 Empfänger Beam gab sich Westinghouse bezüglich der Höhenvermessung zuversichtlich und definierte im Rahmen der übrigen Vermessungsparameter deren Genauigkeit für das neue System wie folgt:

	Verlangt	Erwartet
<input type="checkbox"/> Höhen Vermessung	570 Meter	220 Meter
<input type="checkbox"/> Azimut Vermessung	13 mrad	9 mrad
<input type="checkbox"/> Entfernungs Vermessung	925 Meter	70 Meter

Entfernungsauflösung

Für die Entfernungsauflösung von zwei Radarzielen mit gleichem Reflexionsquerschnitt in einer Entfernung von 70 km, wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 65 % eine erforderliche Entfernungsdifferenz von 500 Meter prognostiziert. Wobei von einer vom Radar ausgesendeten Impulsdauer von 3.25 µs ausgegangen wurde.

Westinghouse Angebot vom Herbst 1981 für Tiefflieger Radar

Im September 1981 unterbreitete Westinghouse einer aus Vertretern der Gruppe Rüstung und der Flugwaffe zusammengesetzten Delegation anlässlich eines Firmenbesuches in Baltimore MD, ein verbindliches Angebot für das weitere Vorgehen bei der Beschaffung des schweizerischen Tiefflieger Radarsystems:

Gemäss dem Angebot sollte mit einer finanziellen Beteiligung der Schweiz zuerst ein Prototyp des in der Westinghouse Studie vom 28. August 1980 beschriebenen TAFLIR – Tiefflieger Radarsystems gebaut werden. Anlässlich einer nochmaligen Felderprobung in der Schweiz sollte der Beschaffungsinstanz die Möglichkeit geboten werden, sich vor Ort von der Leistungsfähigkeit der neuen Entwicklung zu überzeugen. Die Beschaffung der vorgesehenen Seriesysteme war im Angebot lediglich als Option aufgeführt. Von der Annahme ausgehend, dass im laufenden Konkurrenzverfahren von der Schweiz bis Ende 1981 eine Zusage für das Angebot erfolgen würde, wollte Westinghouse bereits im Frühling 1982 mit der Entwicklung und dem Bau des Prototyp-Systems beginnen. Für dessen Fertigstellung war eine Zeitspanne von max. 18 Monaten geplant. Der anschliessend bei der Firma durchzuführende Category I Abnahmetest war bereits für Mitte 1983 geplant. In einem weiteren Schritt sollte das Prototyp System in die Schweiz transportiert werden, um dort in einer ab Herbst 1983 auf verschiedenen Standorten stattfindenden Felderprobung den Category II Test zu bestehen. Bei einem Eintreten auf die Option für die Beschaffung der fünf vorgesehenen Seriesysteme sollte deren Ablieferung bereits um die Mitte der achtziger Jahre erfolgen.

Wie erst später im Projektverlauf bekannt wurde, hatte die Firmenleitung von Westinghouse nur deshalb ihr Einverständnis zu dieser kostspieligen Neuentwicklung gegeben, weil sie erhoffte mit dem für Einsätze unter extremen Clutter-Verhältnissen ausgelegten System auf den internationalen „Defense - Market“ eine Marktlücke finden zu können. Bereits vor Beginn der Entwicklungsarbeiten bestanden Pläne das Prototyp Radarsystem unabhängig vom Ausgehen des schweizerischen Tiefflieger - Radar Beschaffungsprogramms, unter der Bezeichnung VIGILANT Air Defense Radar an den Airshows in Paris, Farnborough und Helsinki einem internationalen Fachgremium vorzustellen und zum Verkauf anzubieten ⁽⁷⁾.

Auf den ersten Blick gesehen, beinhaltete das Angebot für die Schweiz bestechende Vorteile. Das Angebot ermöglichte einen weiteren Risikoabbau, so dass der Beschaffungsentscheid für die Seriesysteme erst gefällt werden musste, nachdem sich die Truppentauglichkeit anlässlich einer weiteren Felderprobung erwiesen hatte. Allerdings kamen bei der näheren Betrachtung auch Zweifel auf ob die optimistischen Erwartungen erfüllt würden und der zeitliche Ablauf bei dem umfangreichen Vorhaben auch realistisch sei. Das Prototyp System existierte ja zu diesem Zeitpunkt in weiten Teilen erst in den Köpfen des Westinghouse Systemarchitekten John W. Taylor und den beteiligten Entwicklungs - Ingenieuren !

Hughes Angebot vom Herbst 1981 für Tiefflieger Radar

Im September 1981 unterbreitete auch Hughes, anlässlich eines Firmenbesuches in Fullerton CA einer aus Vertretern der GRD und der Flugwaffe zusammengesetzten schweizerischen Delegation, ein verbindliches Angebot für das weitere Vorgehen bei der Beschaffung des schweizerischen Tiefflieger Radarsystems:

Das von der Firma Hughes angebotene Tiefflieger Radarsystem entsprach nun in allen Teilen den Anforderungen des militärischen Pflichtenheftes. Das ursprünglich aus dem AN/TPQ-37 Artillerie Firefinder abgeleitete System, verfügte nun über den im militärische Pflichtenheft geforderten Rundsuchmodus wobei zusätzlich auch die elektronische Abtastung des Azimutbereiches von $\pm 45^\circ$ beibehalten wurde.

Auch die Signalverarbeitung sowie die operationelle Software für die Flugwegbildung und Jägerführung war an die schweizerischen Erfordernisse angepasst worden. Hughes beabsichtigte als Anzeigeausrüstungen für das Tiefflieger Radar die gleichen HMD-22 Displaykonsolen zu verwenden wie sie kurz zuvor für ein Upgrade Programm der Florida Radarstationen geliefert hatten. Die HMD-22 Displaykonsole verfügte dank der programmierbaren Mikroprozessor Architektur über ein hohes Mass an Flexibilität bei zukünftig veränderten operationellen Anforderungen⁽⁸⁾.

Die terminliche Realisierung des Projektes stand im Vergleich zum Westinghouse - Angebot weit weniger unter Zeitdruck. Zum einen verzichtete Hughes auf Grund der guten Erprobungsergebnisse auf eine Wiederholung der Felderprobung in der Schweiz, zum anderen war die Ablieferung der Seriesystems erst für die zweite Hälfte der achtziger Jahre vorgesehen.

Entscheidungsfindung bei der Systemwahl für das Tiefflieger Radar

Die schweizerische Beschaffungsinstanz GRD und die Projektverantwortlichen der Flugwaffe standen im Spätherbst 1981 im Hinblick auf die inzwischen erfolgte Entwicklung des Konkurrenz Verfahrens um das TAFLIR - Radarsystem, einer kontroversen Situation gegenüber !

Sowohl das neue Angebot von Westinghouse wie auch dasjenige von Hughes erfüllten auf dem Papier nun weitgehend die Anforderungen des militärischen Pflichtenheftes. Beide Angebote beinhalteten jedoch noch gewisse technischen Risiken welche allerdings beim Angebot von Westinghouse, mit einem zwar kostspieligen Vorgehen, weiter abgebaut werden konnte.

Mit der Firma Hughes befand sich die Schweiz zum Zeitpunkt der Systemwahl bereits in einer 20-jährigen erfolgreichen Geschäftsbeziehung. Diese hätte zweifellos eine gute Ausgangslage für den noch erforderlichen Risikoabbau dargestellt. Insbesondere bei den Vertretern der Flugwaffe hatte sich durch die langjährige Zusammenarbeit bei den Projekten Mirage TARAN System und dem Florida System ein enges Vertrauensverhältnis zur Firma Hughes entwickelt. Hughes verfügte zudem seit den 60er Jahren in der Schweiz über eine gut funktionierende Firmenvertretung mit kompetenten Mitarbeitern.

Die kommerzielle Seite der beiden Angebote wies bedeutende Unterschiede auf. Auf den ersten Blick gesehen hätte das Angebot von Hughes erheblich höhere Beschaffungskosten verursacht. Infolge der finanziellen Beteiligung an der Entwicklung und dem Austesten des Prototyp Systems und den damit verbundenen Eigenleistungen, konnte das Westinghouse Angebot kommerziell jedoch schwerlich direkt mit demjenigen von Hughes verglichen werden.

In den Monaten Oktober und November 1981 befasste sich sowohl die Generalstabsabteilung (GGST), die Beschaffungsinstanz Gruppe Rüstung Dienste (GRD) und die für das Projekt zuständigen Stellen der Flugwaffe intensiv mit den Angeboten der beiden Firmen.

Die GRD war auf Grund ihres Aufgabenkreises sowohl für die Beurteilung des kommerziellen und des technischen Teiles der Angebote zuständig. Die Zuständigkeit der Flugwaffe beschränkte sich auf die Beurteilung des taktischen und technischen Teiles der Angebote.

An einem anfangs Dezember 1981 stattgefundenen Rapport der Flugwaffe hatten sich die Kommandanten der Flieger und Flab Truppen nach Anhörung der Projektsachbearbeiter für das Angebot von Hughes entschieden.

Schlussentscheid bei der Systemwahl für das Tiefflieger Radar TAFLIR

Mitte Dezember 1981 gab das Eidgenössischen Militär Departement (EMD) bekannt, dass das Projektteam aus Vertretern des Generalstabes, der Gruppe für Rüstungsdienste und der Flugwaffe sich im Konkurrenzverfahren um das Tiefflieger Radarsystems TAFLIR für das Angebot der amerikanischen Firma Westinghouse in Baltimore MD entschieden habe.

Projektorganisation TAFLIR

Zu Beginn des Jahres 1982 begannen Aktivitäten auf verschiedenen Ebenen. Sowohl beim Systemlieferanten Westinghouse in Baltimore MD wie auch bei der Projektleitung in der Schweiz waren bereits im Vorfeld der Systemwahl umfangreiche Vorarbeiten getätigt worden.

Westinghouse hatte für die technische und die kommerziell Abwicklung je einen verantwortlichen Projektleiter bestimmt und begann unmittelbar nach dem Eintreffen der Zusage aus der Schweiz, mit dem Aufbau einer Projektorganisation für die Entwicklung und den Bau des TAFLIR Prototypsystems.

In der Schweiz wurde eine Delegation aus Vertretern der Gruppe Rüstung Dienste (GRD) und der Flugwaffe (KFLF und BAMF) zusammengestellt welche vor Ort bei Westinghouse in Baltimore als sog. **On The Job (OTJ) Team** die Entwicklung, den Bau und das Austesten des TAFLIR Prototypsystems mitverfolgen sollte.

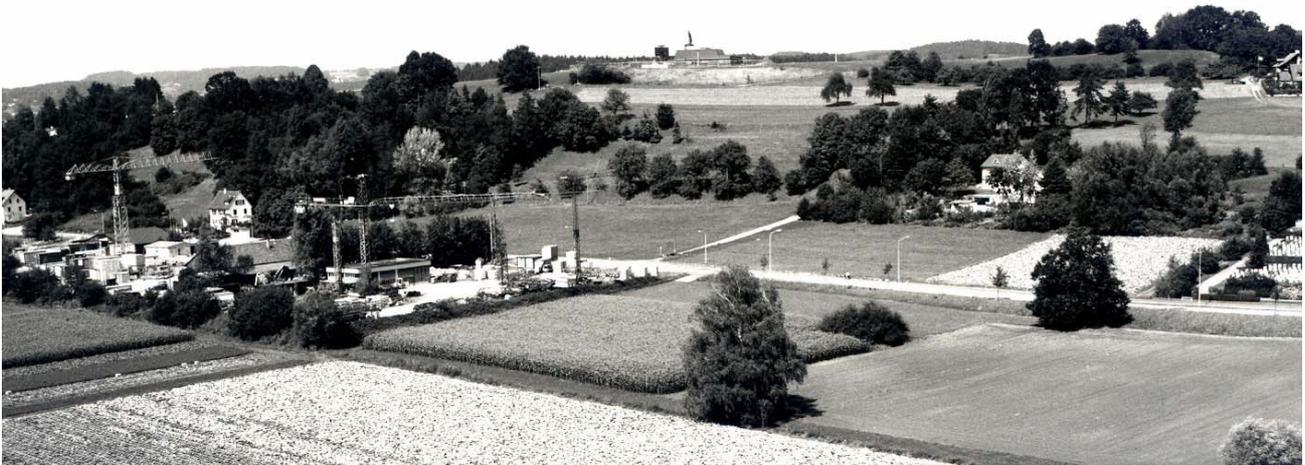
Im März 1982 fand in Bern bei der Gruppe Rüstung Dienste eine Besprechung zwischen den für das OJT - Programm vorgesehenen Schweizer Spezialisten und den kommerziell und technisch verantwortlichen Westinghouse Projektleitern statt. Dabei wurden die Details der Durchführung abgesprochen und der zeitliche Beginn des On The Job Programms auf den 10. Mai 1982 festgelegt ⁽⁹⁾.

Zu Beginn des Jahres 1982 begannen auch vertiefte Abklärungen über den künftigen Einsatz der TAFLIR Systeme. Im provisorisch vorliegenden militärischen Einsatzkonzept waren für den späteren taktischen Einsatz, den technischen Unterhalt und die Unterbringung der fünf zur Beschaffung vorgesehenen mobilen TAFLIR Systemen eine Reihe von Standorten geplant. Im Zusammenhang damit fielen nachfolgende Aufgaben an:

- **Vorbereiten der Standorte Homberg, Wangenerberg, Payerne für die Durchführung des Category II Test.**
- **Evaluieren und allfälliges Vorbereiten der über die Schweiz verteilten Standorte für den späteren taktischen Einsatz der TAFLIR Systeme im Rahmen des Raumschutzes mit den Tiger F5E Flugzeugen**
- **Evaluieren und Ausbau von zwei permanenten Standorten im Bereich der Militärflugplätze Dübendorf und Payerne**
- **Planen und Bau einer Fachstelle für den technischen Unterhalt der TAFLIR Systeme**
- **Planen und Einrichten einer Logistikbasis für den Unterhalt**
- **Planen und Bau von Einstellhallen für die Lagerung der zwischenzeitlich nicht im Einsatz befindlichen TAFLIR Systeme**

Infolge der erforderlichen umfangreichen und zeitlich aufwendigen Bauvorhaben für den permanenten TAFLIR Standort und der Unterhaltsbasis in Dübendorf, musste dieses Vorhaben vordringlich angegangen werden. Auch die Evaluation eines Standortes für die permanente Installation des TAFLIR Systems in der Nähe des Militärflugplatzes Payerne und die Planung der Bauten für die Einstellhallen musste zielstrebig vorangetrieben werden. Im Laufe der Jahre 1982/83 entstanden in Zusammenarbeit mit den Baufachorganen des Bundes die Projekte für die permanente TAFLIR Einsatzstelle kombiniert mit der Unterhaltsbasis auf dem Wangenerberg oberhalb des Militärflugplatzes Dübendorf sowie die Projekte für die TAFLIR Einsatzstelle Monbrelloz in der Nähe des Militärflugplatzes Payerne und die beiden Einstellhallen in der Zentralschweiz.

In der Mitte des Bildes ist die spätere TAFLIR Einsatzstelle Wangenerberg ersichtlich

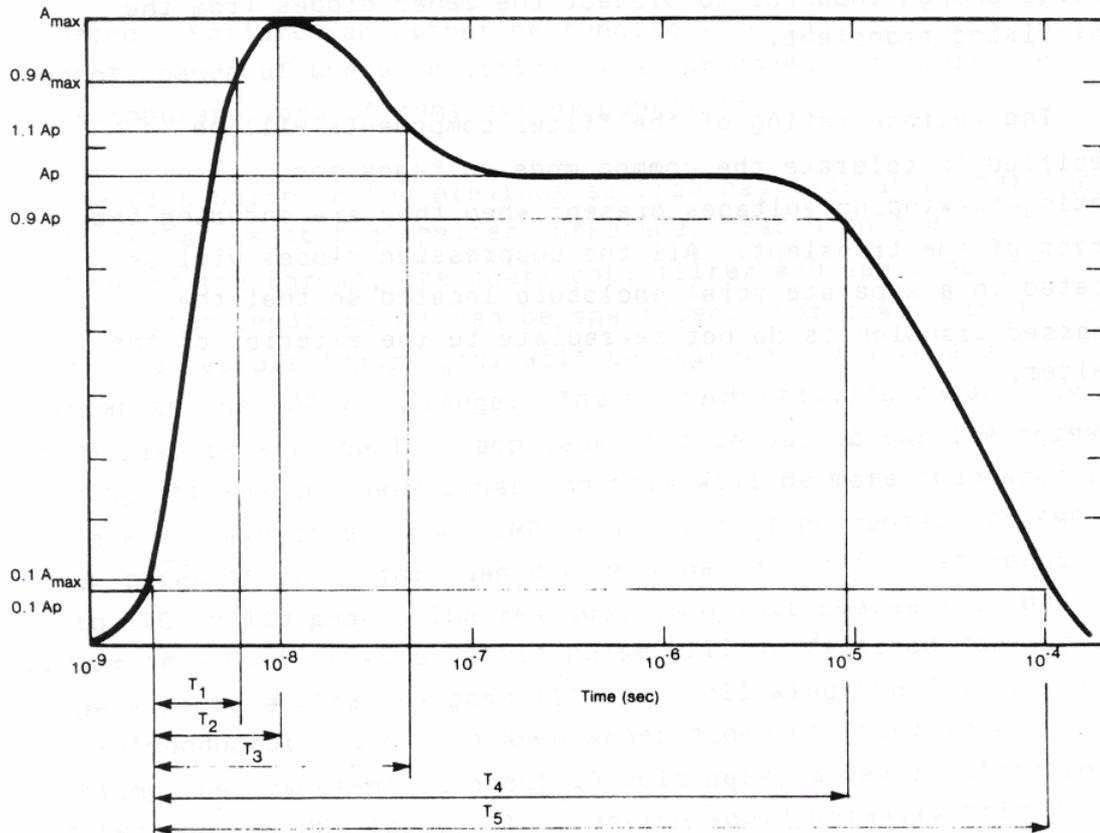


Vorkehrungen gegen „Nuclear Electro Magnetic Pulses“ (NEMP) beim TAFLIR

Zu Beginn der achtziger Jahre wurden von der Generalstabsabteilung für neue militärische Systeme und Bauten Schutzmassnahmen gegen die Bedrohung durch „Nuclear Electro Magnetic Pulses“ (NEMP) gefordert. Diese Forderung betraf auch das TAFLIR System und die im Zusammenhang damit zu erstellenden Bauten für die permanente TAFLIR Betriebsstelle und Unterhaltsbasis Wangenerberg, sowie der Einstellhallen für die zwischenzeitliche Unterbringung der mobilen TAFLIR Systeme.

Bei der Bedrohung durch NEMP ging man damals davon aus, dass die beim Einsatz von Nuklearwaffen auftretende ionisierende Gamma- und Neutronen-Strahlung in der oberen Atmosphäre starke Elektronenströme verursacht. Diese Elektronenströme erzeugen zusammen mit dem Erdmagnetfeld starke elektromagnetische Felder welche in elektrischen oder elektronischen Anlagen verheerende Schäden verursachen können. Die dabei im Innenraum der metallenen Shelter noch auftretenden Restfeldstärken stellen keine unmittelbare Gefahr für die empfindlichen elektronischen Schaltungen dar. Das sog. NEMP „Hardening“ reduzierte sich auf eine geeignete Shelter - Konstruktion und die elektrische Filterung der Kabeleinführungen. Für den Grobschutz im Bereich von Multimegavolt bis einigen Kilovolt kommen sog. „Arrestoren“ d.h. Funkenstrecken wie sie seit langem für den Blitzschutz Verwendung finden, zur Anwendung. Diese z.B. von der amerikanischen Firma Joslyn hergestellten Arrestoren vermögen bis zu 125 kA während 15 μ s abzuleiten und genügen den bei NEMP Einwirkung zu erwarteten 4 kA vollumfänglich. Beim zeitlichen Verlauf der NEMP Bursts zünden die Funkenstrecken der Arrestoren bereits bei etwa 1500 Volt. Die verbleibenden Transienten von 1500 Volt mit einer Dauer von ca. $\frac{1}{4}$ μ s werden durch die 40 dB Dämpfung der Tiefpass - Filter auf < 20 Volt reduziert. Die Tiefpass Filter müssen derart konzipiert werden, dass sie für den Puls - Burst eine hohe Impedanz darstellen und diese dadurch zurückreflektieren um die Arrestoren am Eingang zum Ansprechen zu bringen. Zum Ableiten der nach den Filtern noch verbleibenden Impuls - Transienten werden Metalloxyd - Varistoren verwendet. Obschon zu Beginn der achtziger Jahre geeignete Komponenten zur Abschwächung der NEMP Bedrohung auf dem Markt vorhanden waren, erforderte die praktische Realisierung der Abschirmungen und Einführung ein hohes Mass an Spezialwissen.

In der nachstehenden Figur ist der zeitliche Verlauf eines durch NEMP Einwirkung verursachten Energie Impulses dargestellt. Man rechnete dabei mit elektrischen Feldstärken bis zu 50 kV/m, wobei sich das Frequenzspektrum über den Bereich von 150 kHz bis 10 GHz erstreckt. Da für das mobile TAFLIR System die Unterbringung in metallischen Shelter geplant war, konnte bei einer sorgfältigen Konstruktion und der Anwendung von geeigneten Schutzmassnahmen bei den Kabeldurchführungen eine Abschwächung der Feldstärke in einer Grössenordnung von über 60 dB erwartet werden.



Parameter	E-Field	H-Field
T_1	5 nsec	5 nsec
T_2	10 nsec	10 nsec
T_3	50 nsec	50 nsec
T_4	200 μ sec	10 μ sec
T_5	500 μ sec	100 μ sec
A_{max}	40 kV/m	200 A/m
A_p	30 kV/m	150 A/m

A_{max} = Maximum Field Amplitude

A_p = Plateau Field Amplitude

In den westlichen Ländern war zu diesem Zeitpunkt das erforderliche „know how“ nur bei ganz wenigen spezialisierten Firmen vorhanden denen Zugang zu den Resultaten der Atomversuche gewährt wurde.

Für den NEMP Schutz der für den Betrieb, Unterhalt und die Einlagerung der TAFLIR Systeme erforderlichen Bauten mussten Abschirmungen in Form eines Faraday - Käfigs erstellt werden.

Diese lückenlose Metall - Ummantelung bedingte eine aufwendige und teure Bauweise mit schleusenartigen Konstruktionen für die Türen und Eingangstore welche nur durch spezialisierte Firmen ausgeführt werden konnten. Analog wie bei den mobilen TAFLIR-Shelter mussten dabei sämtliche Kabelfurchführungen elektrisch gefiltert werden.

Verlauf des TAFLIR Prototyp Projektes bei der Firma Westinghouse

Als die aus Vertretern der Gruppe Rüstung Dienste und der Flugwaffe zusammengesetzte Delegation Mitte Mai 1982 bei der Firma Westinghouse eintraf, bestand nachfolgende TAFLIR Projektorganisation:

TAFLIR Projektleitung bestehend aus:

- System-Architekt**
- technischem Projektleiter**
- kommerziellem Projektleiter**

TAFLIR Entwicklungsleiter mit den angegliederten:

- System Engineering Group**
- Mechanical Engineering Group**
- Power Generation Group**
- ULSA Antenna Group**
- Receiver Laboratory Group**
- Signal Processing Group**
- Display System Group**
- Firmware Design and Development Group**
- Operational Software Design and Development Group**

Die einzelnen Gruppen befanden sich im Mai personell noch im Aufbau und erreichten erst im Laufe des Sommers 1982 ihren vollen Bestand. Insgesamt umfasste die Projektorganisation **ca. 120 Hardware- und Firmware/Software Ingenieure**. Räumlich war die gesamte Projektorganisation zentral in Grossraum - Büros untergebracht. Zum gegenseitigen Informationsaustausch in und ausserhalb der Gruppen wurden wöchentlich sog. „**Critical Design Reviews**“ durchgeführt an denen der Systems Architekt, die betroffenen Entwicklungsingenieure, die Vertreter des schweizerischen OJT - Teams sowie öfters auch externe Berater teilnahmen.

Westinghouse hatte die Herstellung und Lieferung von nachfolgenden Baugruppen und Teilsystemen an Unterlieferanten vergeben:

- Radar - Shelter für die Unterbringung des Radarsystems**
- Antennen - Pedestal mit dem Drehplatten- und Antriebssystem**
- Sekundärradarsystem**
- Computerausrüstung mit den Hilfsausrüstungen für die Datenverarbeitung**
- Stromversorgungsgeräte**
- Mikrowellenröhren**

Das Firmengelände der Westinghouse Electric Corporation befand sich am Rande des BWI International Airport Washington – Baltimore. Bei Beginn des TAFLIR Radar Projektes im Frühling 1982 beschäftigte das Werk Baltimore ca. 8500 Mitarbeiter.



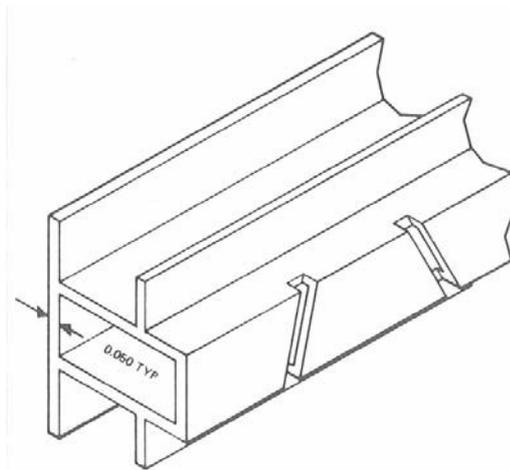
Das nachstehende Papier zeigt eine typische Einladung zu einem der „Design Review Meetings“ anlässlich denen die Entwicklungsingenieure ihre Entwürfe den für die Nahtstellen verantwortlichen Kollegen präsentieren mussten. Aus dem Verteiler geht der ungefähre Grösse der TAFLIR Projektorganisation im Herbst 1982 hervor

From : CCD
 WIN :
 Date : October 6, 1982
 Subject: Design Review on Taflir Doppler Generation

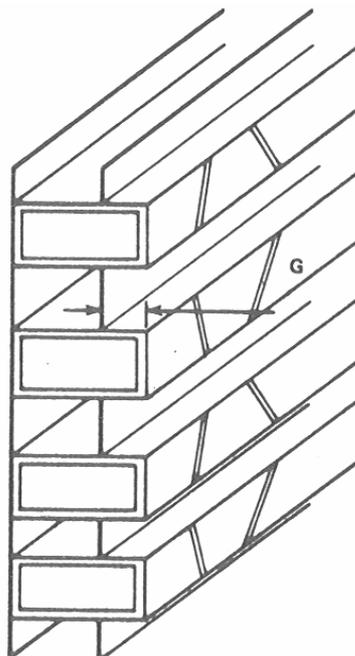
To :	J. Kopp	MS 1287	G. Bone	MS 1287
	T. Keast	MS 1287	L. Hazel	MS 1287
	J. Taylor	MS 883	R. Grabinski	MS 717
	J. Shrum	MS 1287	H. Jucker	MS 1287
	C. Dudzinsky	MS 1287	C. Hutchison	MS 1287
cc:	L. Jeffries	MS 1282	B. Birchard	MS 743
	T. Chrzanowski	MS 743	R. Rybarczyk	MS 1287
	T. Krauth	MS 1287	P. Auerbach	MS 1287
	W. Oehrrill	MS 885	E. Harrison	MS 743
	A. Woods	MS 1287	J. Oeffinger	MS 1287
	E. Hooper	MS 1287	J. Aberg	MS 1287
	T. Lewandowski	MS 1287	L. Meren	MS 905
	D. Harris	MS 1287	V. Walker	MS 992
	M. Roden	MS 1287	T. Foster	MS 709
	W. Evans	MS 1287	A. Surkovich	MS 992
	J. Rademacher	MS 1287	G. Martin	MS 895
	R. Jones	MS 1287	J. Dollard	MS 609
	G. Wixom	MS 701	C. Jones	MS 759
	V. Grams	MS 1287	G. Dunnigan	MS 743
	K. Horenkamp	MS 1287	F. Timmel	MS 701
	H. Airth	MS 699	P. Kennedy	MS 709
	K. Holub	MS 1287	R. Koehler	MS 693
	R. Carhart	MS 1287	S. Wachs	MS 623
	G. Hunziker	MS 1287	E. Kuhn	MS 1287

ULSA Antenne für das TAFLIR Prototypsystem

Aus nachvollziehbaren Gründen verlangte die Firmenphilosophie von Westinghouse, dass die Herstellung sämtlicher ULSA Baugruppen inkl. deren Montage und Ausprüfung werksintern erfolgte. Die Antennen - Array deren Ausdehnung in der horizontalen ca. 5.5 Meter und in der vertikalen ca. 3.5 Meter beträgt musste für den Strassen-transport aus Platzgründen in ein dreiteiliges Paket gefaltet werden können. Für die Strahler-elemente der im S-Band arbeitenden TAFLIR ULSA Array wurde WR-284 Wellenleiter verwendet welche eine Abmessungen von 2.84" (a-Dimension) x 1.34" aufweist. An den ca. 5.25 Meter langen Wellenleitern sind 98 Radiator - Slots ausgefräst. Die a-Dimension ist kritisch sie beeinflusst den Schiefehler („squint angle“) der Strahlungskeule, sie darf über die gesamte Länge des sticks nur ca. $\frac{5}{100}$ mm variieren.

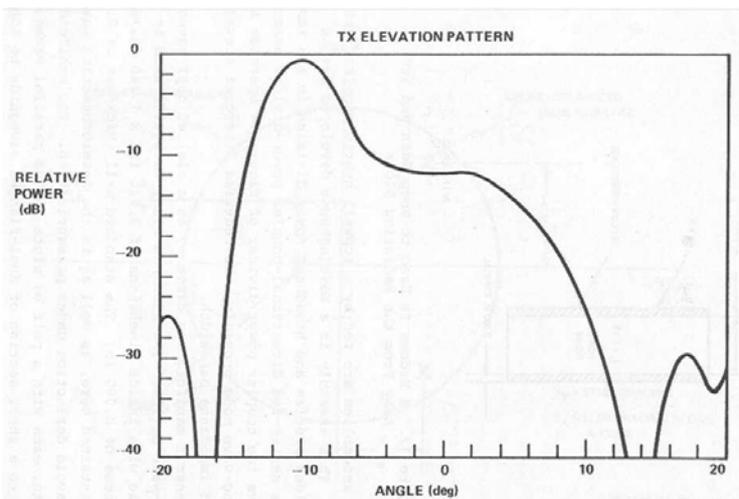
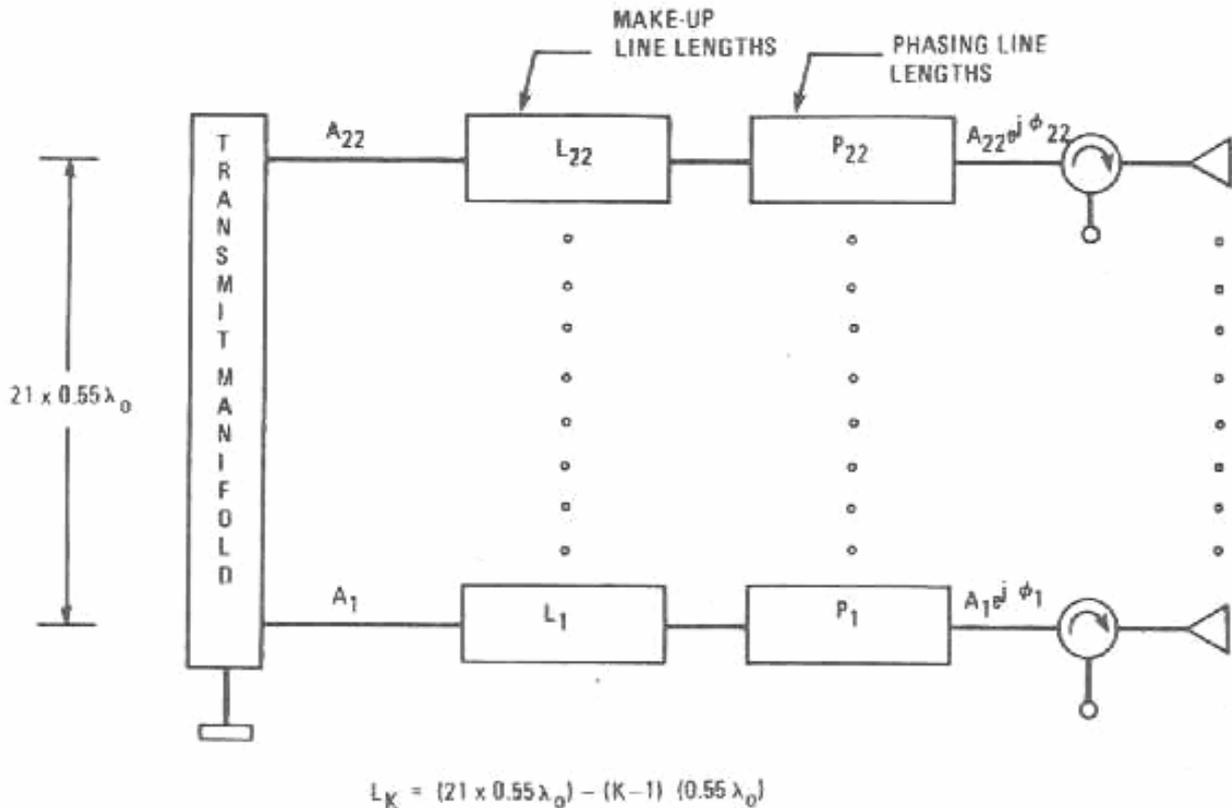


Die Antennen-Array besteht aus insgesamt 48 vertikal übereinander angeordneten Strahler-elemente welche gleichzeitig die Struktur der Array bilden. Sämtliche 48 Strahler weisen gleichartige Radiator Slots auf, sie sind jedoch so angeordnet, dass benachbarte seitenverkehrt zueinander liegen. Die Strahler-elemente müssen mit grosser Genauigkeit montiert werden, die Unebenheiten der Frontfläche darf nur ca. 1mm betragen. Von den 48 Strahler-elemente werden die unteren 22 sowohl für das Abstrahlen der Sendeenergie wie auch als Teil der Empfangs-Antenne benützt. Jedoch sämtliche 48 „radiator sticks“ werden zur Bildung der „staked beams“ für den Empfang verwendet.



Westinghouse hatte zu Beginn der siebziger Jahre mit grossem finanziellem und zeitlichem Aufwand die Technologie der Ultra Low Sidelobe Antennen erarbeitet und versuchte nun das „know how“ gegenüber der Konkurrenz sorgfältig abzuschirmen. Wie es sich erst später beim Einholen der Exportlizenz für die Seriesysteme herausstellte, bestanden auch beim **US State Department** noch Ende der achtziger Jahre Einschränkungen für den Export von ULSA - Technologie ins Ausland.

Die ULSA erzeugt sendeseitigen einen „Fan Shaped Beam“ durch die Aufteilung und leistungsmässige Gewichtung der Senderleistung im sog. „Transmit Manifold“ in 22 Kanäle. Anschliessend werden damit die unteren 22 Strahlelemente der Array gespeisen. Die Speisung der Strahlerelemente erfolgt über 22 individuelle Umwegleitungen die als Phasenschieber wirken zur Formung des „Fan Shaped Beam“.



Die Abstrahlung der Sendeleistung durch die ULSA entspricht in der Elevationsrichtung einer cosecant² Charakteristik. In der Azimutrichtung ist die ULSA voll wirksam die Halbwertsbreite beträgt ca. 1.7°. Der Haupt/Seitenkeulenabstand erreicht einen Wert von > 44 dB.

Die unteren 22 Strahlerelemente der ULSA werden sowohl für die Aussendung und den Empfang der Radarsignale benutzt. Die Aufteilung des Sende- und Empfangspfades erfolgt durch die auf dem nachstehenden Foto ersichtliche Sende/Empfangs Auf-trennung. Durch den Wellenleiter (unten rechts) tritt das Sendersignal in den Ferrit-Zirkulator in der Mitte ein. Das Sendersignal wird durch den Zirkulator im Uhrzeiger-sinn gedreht und über den Wellenleiter (unten links) zum Strahlerelement der ULSA geführt. Im Gegenuhrzeigersinn zum Wellenleiter (oben) der zum Empfänger führt wird das Sendersignal um 20 dB abgeschwächt, so dass nur noch 1% in den Receiver Protector (ganz oben) gelangt. Die darin enthaltene Gaszelle ionisiert dadurch und bildet eine Sperre für das restliche Sendersignal. Das Empfangssignal tritt von der ULSA über den Wellenleiter (unten links) in den Ferrit Zirkulator ein wird von diesem im Uhrzeigersinn gedreht und gelangt über den Wellenleiter (oben) in den Emp-fangspfad.



Im Empfangsfall werden sämtliche 48 Strahlerelemente der ULSA zur Erzeugung der aus 7 Empfangskeulen gebildeten „stacked beam“ Strahlungscharakteristik benutzt. Der Elevationsbereich überdeckt dabei einen Winkel von 25°. Die „stacked beams“ werden durch zwei „beam forming“ Matrizen erzeugt. In einem ersten Schritt werden die von den 48 Strahlerelementen empfangenen Signale in einem aus drei sog. „Butler – Matrizen“ bestehenden Netzwerk in 16 symmetrische Sin^x/x Strahlungskeulen geformt. Dabei erzeugt jedes an einem der 16 Eingänge der „Butler-Matrize“ eintretende Signal an jedem der 16 Ausgänge Signale von gleicher Amplitude jedoch linear verteilter Phase. Für die ULSA mit ihren 48 Strahlerelementen entsteht dadurch ein Muster aus 16 Sin^x/x Strahlungskeulen die bezüglich ihrer vertikalen Lage linear über den Elevationsbereich verteilt sind und symmetrisch zur Mittelsenkrechten (Array - Normal) der Antennenoberfläche liegen.

Siehe in nachfolgender Tabelle die Lage der Sin x/x Beams in Bezug zur Mittelsenkrechten (Array – Normal) der Antennenoberfläche:

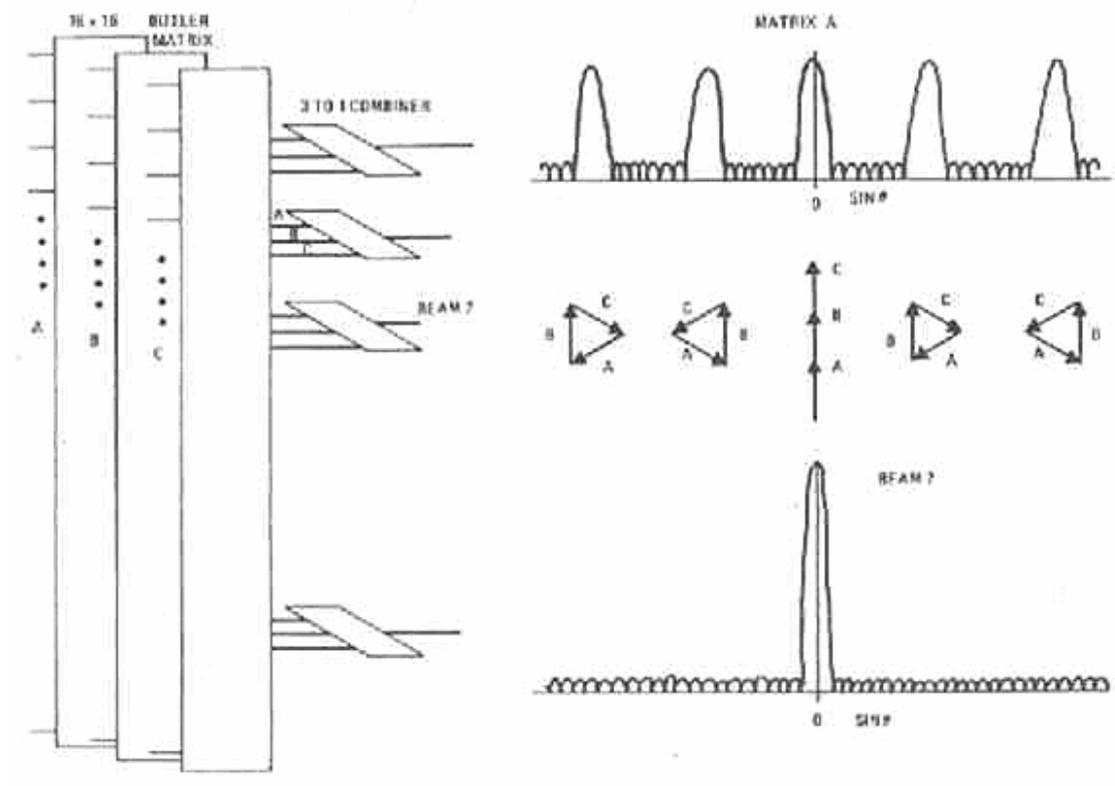
Sin x/x Beam No.	Position in degrees relative to Array Normal
0	-12.7651
1	-11.0487
2	-9.3323
3	-7.6243
4	-5.9230
5	-4.2270
6	-2.5348
7	-0.8447

Mittelsenkrechte oder Array Normal

8	0.8447
9	2.5348
10	4.2270
11	5.9230
12	7.6243
13	9.3323
14	11.0487
15	12.7651

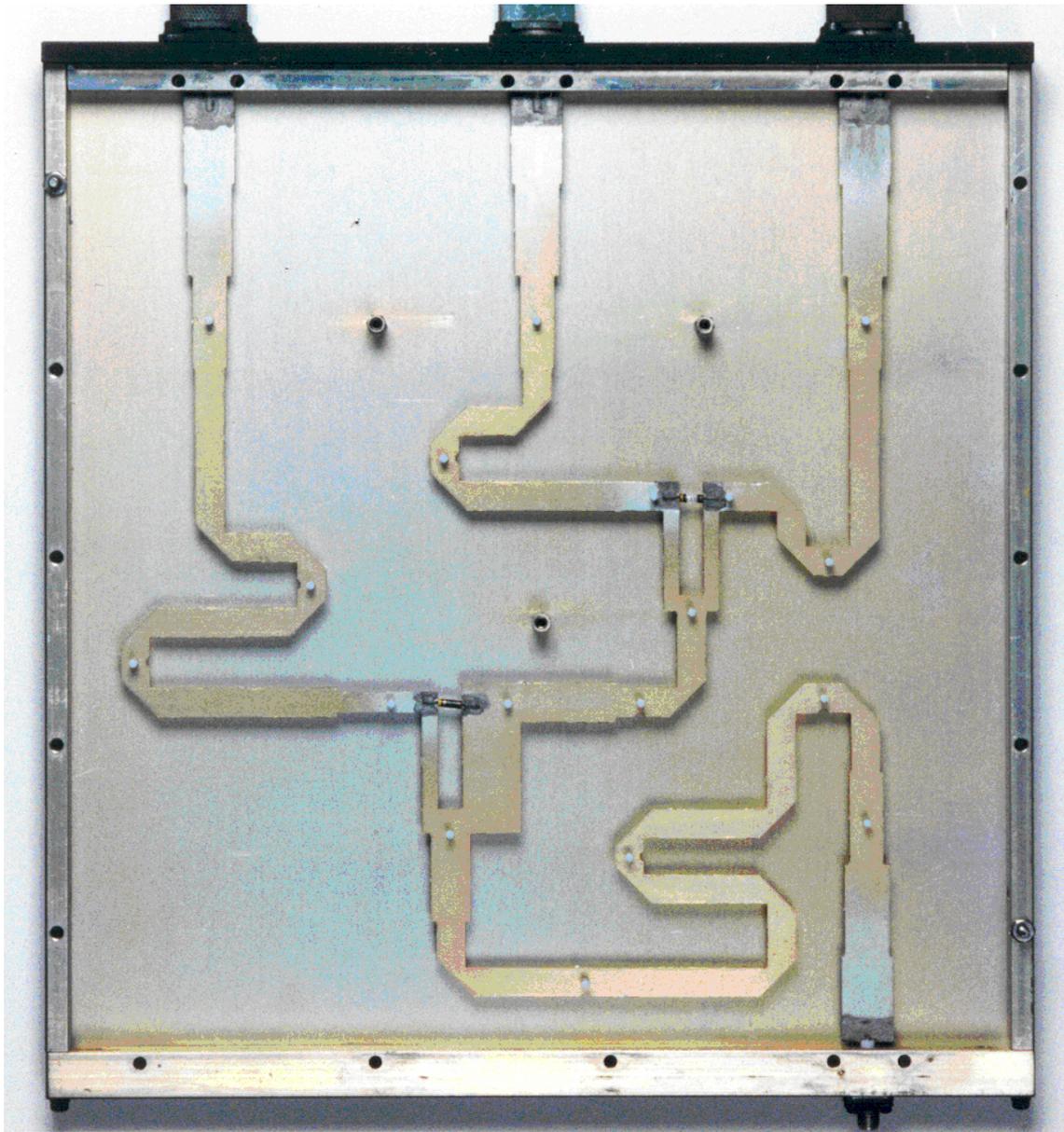
Jede der drei Butler Matrix ist mit jedem dritten Strahlerelement verbunden: Butler Matrix I mit 1, 4, 7 ... Matrix II mit 2, 5, 8 ..., Matrix III mit 3, 6, 9

Die je 16 Ausgänge der drei Butler Matrix mit der Information der 48 Strahlerelemente weisen gegeneinander eine lineare Phasen - Versetzung auf.



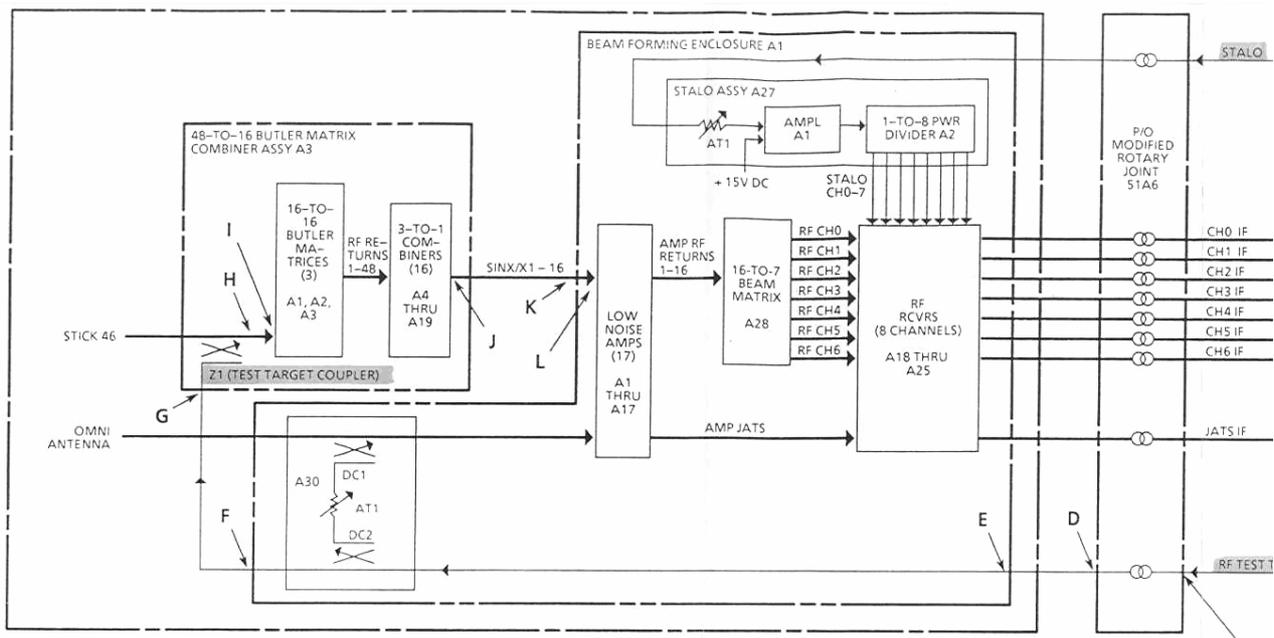
Um eine über die gesamte ULSA kontinuierliche Phasen - Front zu erzeugen müssen die Ausgänge in 3:1 Combiner zusammengeführt werden. Durch diese Kombination werden auch die in den einzelnen Butler - Matrizen enthaltenen Grating - Lobes eliminiert. Die vertikalen Grating - Lobes welche in Abhängigkeit des vertikalen Abstandes der einzelnen Strahlerelemente auftreten, sind bei der Zusammenschaltung von jedem dritten Strahlerelement in der Butler Matrix von den ursprünglich 0.7λ auf $(3 \times 0.7 \lambda)$ d.h. auf 2.1λ erhöht worden.

In der nachstehenden Figur eine 3:1 Combiner - Einheit in geöffnetem Zustand ersichtlich. Wie auch bei der Butler- und der 16:7 Receiver Matrix sind die Netzwerke in der bei Mikrowellengeräten häufig angewendeten Streifenleitungstechnik ausgeführt. Die beiden ohmschen Widerstände dienen für die Symmetrie der Eingänge.



In einem zweiten Schritt werden aus den 16 Sin x/x Strahlungskeulen die eigentlichen 7 Empfangskeulen gebildet. Das Blockschaema auf der nächsten Seite vermittelt den Ueberblick über das Zusammenwirken der verschiedenen Funktionsgruppen des Radarempfänger Frontendes. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass die Signale der Sin x/x Strahlungskeulen mit „Low Noise Amplifier“ (LNA) verstärkt werden bevor sie in die 16 zu 7 Empfänger - Matrize gelangen.

Bei den LNA's handelt es sich um zweistufige Transistorverstärker mit einer niedrigen Rauschzahl von ca. 2.5 dB und einer Verstärkung von 20 dB.



Bedingt durch die Anforderungen der Höhenvermessung (Beam – Splitting) und der Dopplerfilterung müssen die LNA's über einen Dynamikbereich von 100 dB verfügen. Wie auf dem nachstehenden Foto sichtbar, sind die LNA - Einheiten zur Reduktion von Rückwirkung auf die Bildung der Strahlungskeulen sowohl an den Ein- und den Ausgängen mit Ferritisolatoren ausgerüstet. Beim Bauteil mit den Bezeichnungen CR1 – CR6 handelt es sich um ein „Pin Dioden Limiter“ der die Aufgabe hat den empfindlichen Eingangstransistors vor Beschädigungen durch stark einfallende Signale (Sender – Leak etc.) zu schützen. Die eigentliche Verstärkerschaltung ist zum Schutze vor Umwelteinflüssen hermetisch verschweisst.

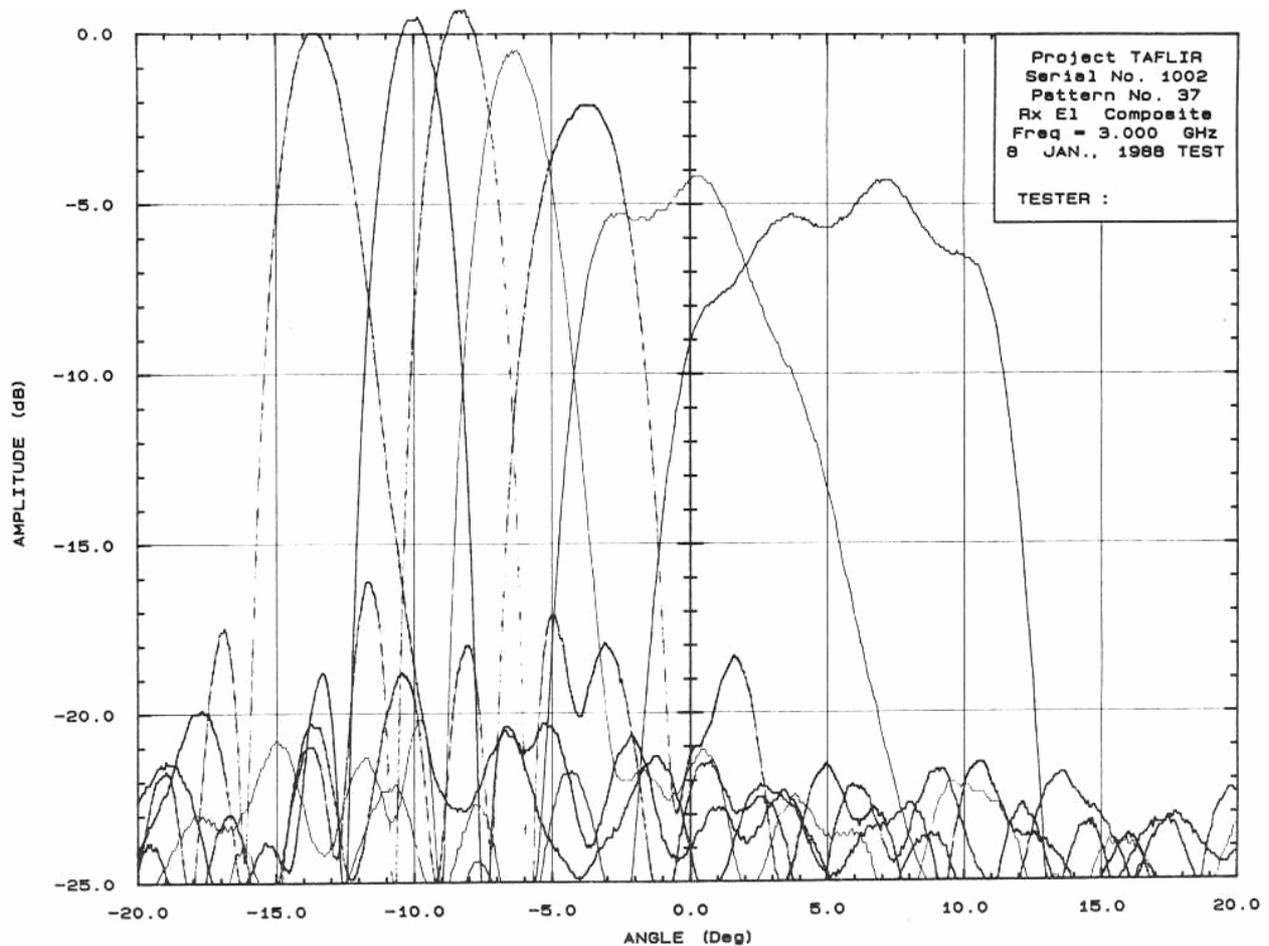


Zur Bildung des „stacked beam pattern“ sind konstante Verstärkungs- und Phasenverhältnisse Voraussetzung. Auch an die koaxialen Verbindungskabel und Stecker zwischen den Strahlerelementen der ULSA und den verschiedenen Matrizen - Netzwerken werden daher sehr hohe Stabilitätsanforderung gestellt.

Um die für das TAFLIR System spezifizierte Genauigkeit der Höhenvermessung von Radarzielen zu erreichen, müssen die 16 im Empfangssystem vorhandenen LNA's über den gesamten Temperaturbereich eine Stabilität von ± 0.5 dB bezüglich Gain und von $\pm 5^\circ$ bezüglich der Phase aufweisen. Eine Ueberschreitung dieser Toleranzen würde Fehler bei der Höhenvermessung verursachen.

In der anschliessenden 16:7 Receiver-Matrix erfolgt durch eine resistive Gewichtung beim Einkoppeln der einzelnen Sin x/x Beams in die Empfangskanäle die Bildung der 7 Empfangskeulen.

Die nachstehende Figur zeigt die Strahlungscharakteristik des „stacked beam pattern“ mit den 7 Empfangskeulen bei einer Arbeitsfrequenz von 3 GHz. Die verschiedenen Beams weisen relativ unterschiedliche Keulenformen auf. Ersichtlich aus der Figur ist auch, dass der Antenne in der Elevationsebene die ULSA Eigenschaft fehlt.



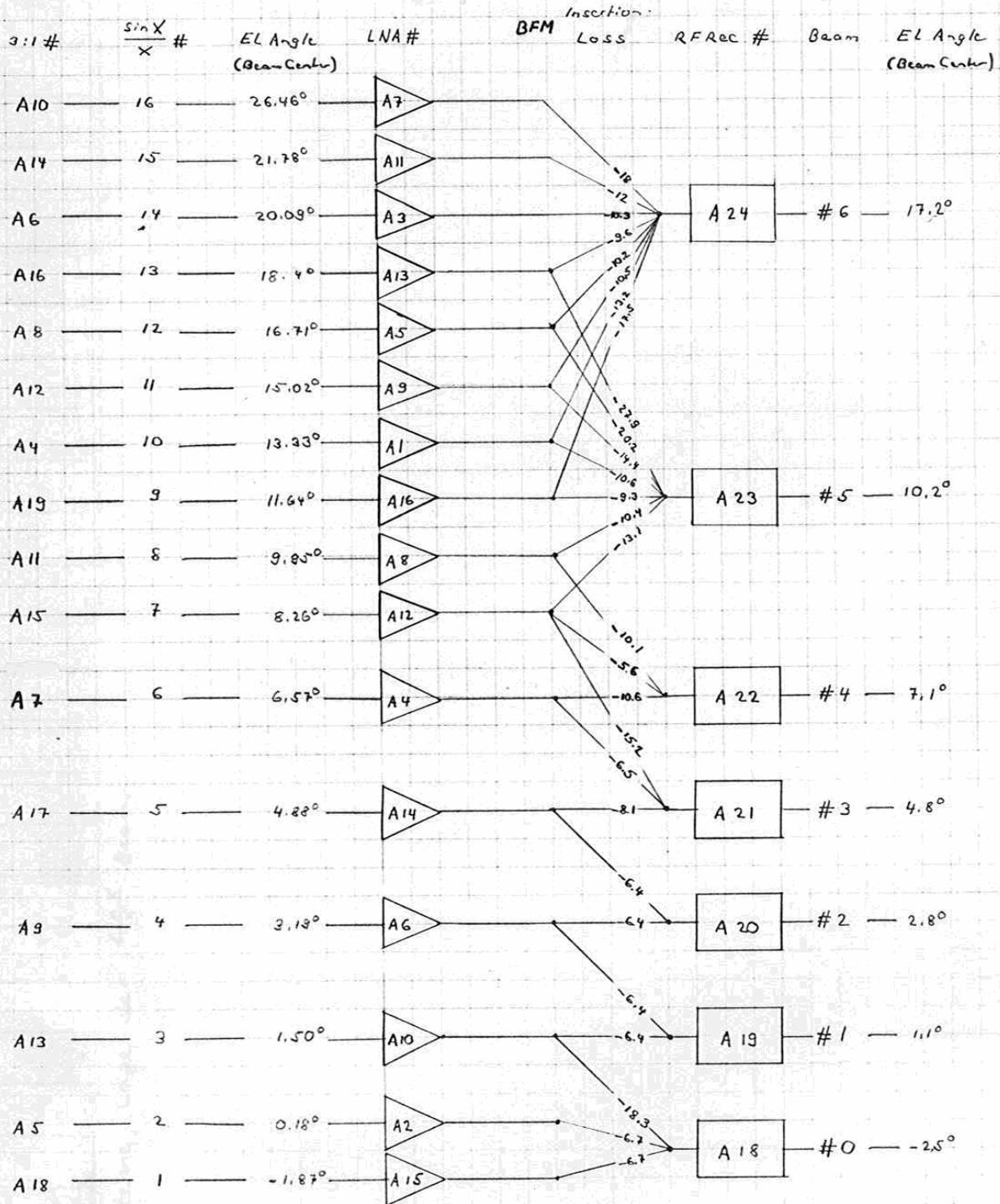
Das Radarempfänger Frontende verfügt über keine frequenzmässige Vorselektion. Eine Begrenzung der Bandbreite nach unten erfolgt einzig durch die „cut- off“ Wellenlänge der als Wellenleiter wirkenden Strahlerelemente der ULSA. Sowohl die LNA's wie auch die verschiedenen Beam Forming Netzwerke weisen Bandbreiten von über 500 MHz auf.

Dieser Umstand muss vor allem im Zusammenhang mit der Bedrohung durch aktive elektronischen Breitbandstörungen beachtet werden !

In der Figur auf der nächsten Seite ist die Bildung der 7 Empfangskeulen aus den 16 symmetrischen Sin x/x Strahlungskeulen aufskizziert. Wie aus der Skizze hervorgeht sind an der Bildung jeder Empfangskeule mehrere Sin x/x Strahlungskeulen beteiligt, wobei deren vertikale Lage und deren Keulenform durch die resistive Gewichtung der Anteile aus den Sin x/x Keulen bestimmt werden.

Die Winkelangaben (rechts in der Figur) entsprechen der effektiven Elevation des Zentrums der Empfangskeulen, wobei der mechanisch einstellbare Antennen - Tilt der ULSA von 10.5° bereits berücksichtigt ist. (Die Antennenoberfläche ist gegenüber der Vertikalen um den Tilt – Winkel zurück geneigt)

TAFLIR Radarsystem Receive Beam Forming



Anschliessend gelangen die 7 Empfangssignale in die 7 Superheterodyn - Empfänger und werden dort mit der Frequenz des Lokoszillators auf eine Zwischenfrequenz von 30 MHz abgemischt. Bei den Empfängermischkreisen (RF - Receiver) handelt es sich um „Double Balance Mixer“ bei dem zur Erzeugung der 27 Empfangsfrequenzen wahlweise das untere oder das obere Seitenband ausgewählt werden kann.

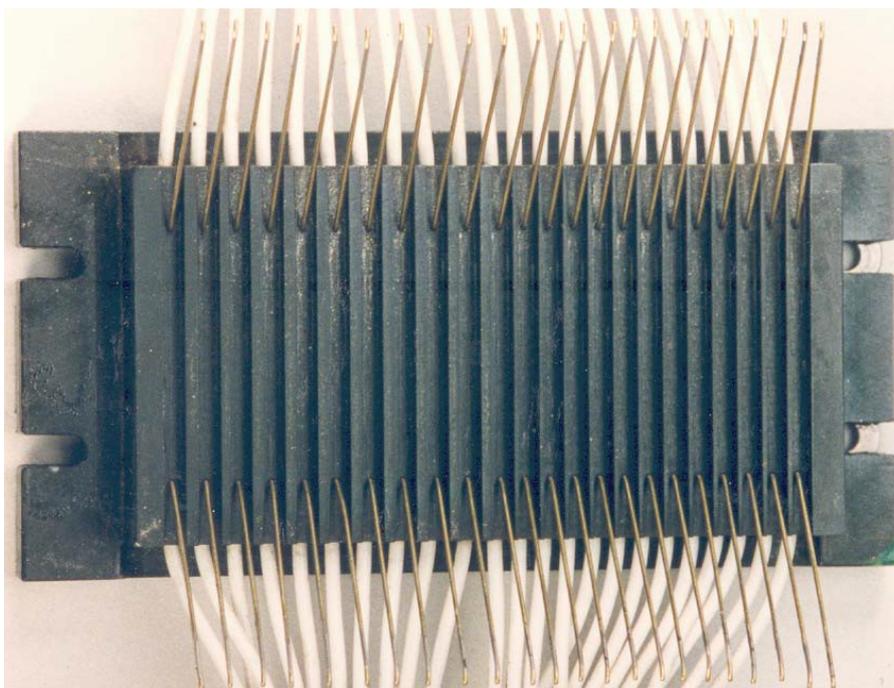
Die 7 aus dem Mischprozess anfallenden Zwischenfrequenzsignale werden von der rotierenden Antenne galvanisch über eine mehrkanalige Schleifringeinheit (siehe Fotos und Kommentar auf der nächsten Seite) zur weiteren Verarbeitung in die Zwischenfrequenzverstärker im Radar - Shelter übertragen.

Der Zwischenfrequenzverstärker (IF - Receivers) stellt das eigentlichen „matched filter“ des Empfangssystems dar. Er ist mit der Bandbreite von 2.4 MHz auf die Pulsbreite des Sendesystems optimiert.

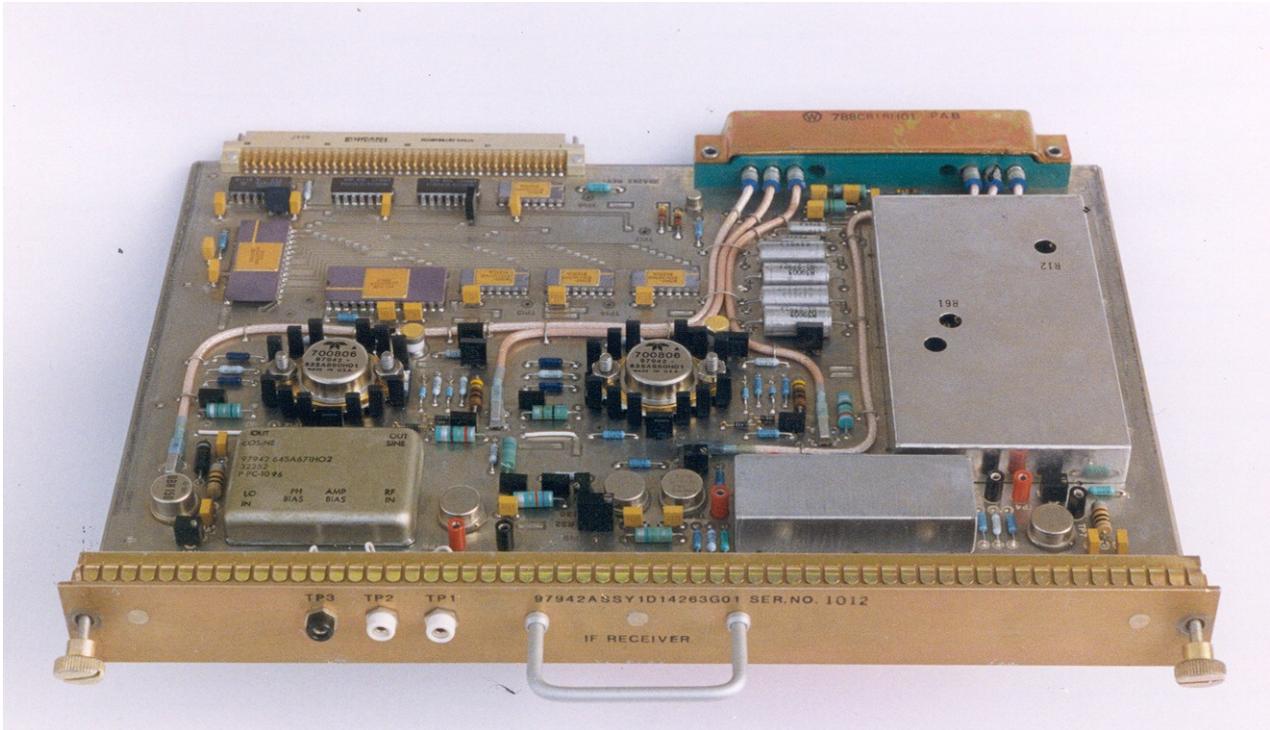
Die Schleifringeinheit für die Uebertragung der ZF – Signale von der rotierenden Antenne zu den ZF – Verstärkern im Radar – Shelter war anfänglich eine kritische Schwachstelle im TAFLIR – Radarsystem. Da die ZF – Signale in einen Dynamikbereich von 100 dB variieren können, dürfen schwache Signale nicht durch zu hohes Eigenrauschen des Schleifring - Bürsten Ueberganges beeinträchtigt werden. Zudem muss vermieden werden, dass durch den im Dauerbetrieb anfallenden metallischen Abrieb elektrisch leitende Brücken zwischen den einzelnen ZF – Kanälen entstehen, welche beim Beam – Splitting Verfahren zwangsläufig Fehler in der Höhenvermessung der Radarziele verursachen würden. Erst nach vielen Versuchen konnte eine befriedigende Lösung gefunden werden, welche eine wartungsfreie Uebertragung während > 5000 Betriebsstunden sicherstellte.



Bürsteneinheit der Schleifringübertragung



Die Verstärkung des IF - Receivers (siehe Foto) beträgt max. 47 dB. Der IF - Receiver ist Teil des digitalen Servokreises welcher den Gleichlauf der 7 Empfangskanäle bezüglich Amplitude, Phase und Gleichstrompegel sicherstellt. Das verstärkte IF – Signal wird anschliessend mit dem Signal des Kohärent Oszillator (Coho) in der Phase verglichen. Zur Vermeidung von Coho – Blindphasen (Signalauslöschung am MTI Phasendetektor bei Nulldurchgang der Coho – Schwingung) wird das MTI Signal in zwei gegeneinander um 90° phasenverschobene I und Q Komponenten aufgeteilt.



Vermessung der Ultra Low Sidelobe Antenne

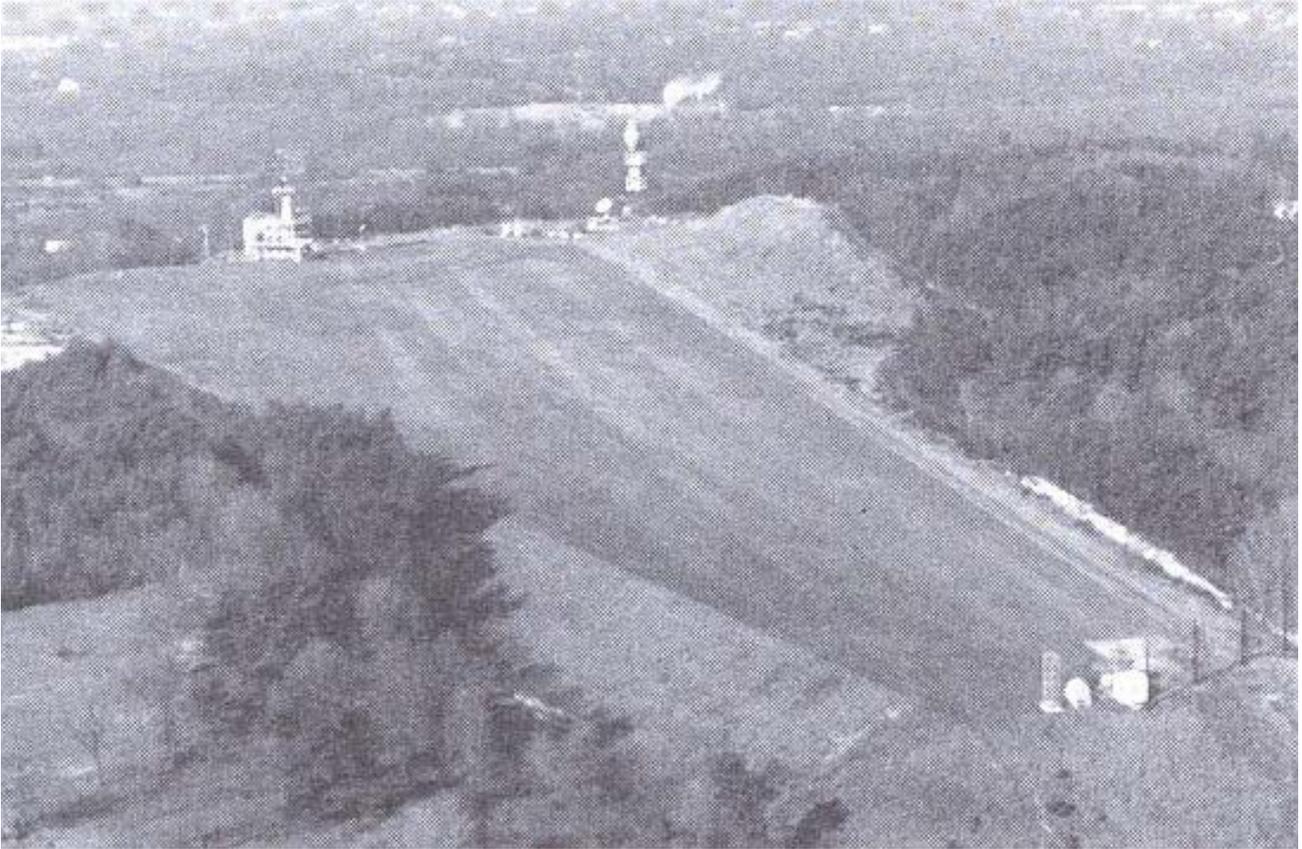
Die Entwicklung und die Herstellung der Ultra Low Sidelobe Antenne, mit dem empfangsseitigen „stacked beam pattern“, stellte auch sehr hohe Anforderungen an die Verfahren zum Ausmessen der Strahlungscharakteristiken. Auf Grund dem damaligen Stand der Antennenmesstechnik kam dafür nur eine Vermessung im elektromagnetischen Fernfeld in Frage. Für die Vermessung musste sich die Antenne in einem bezüglich Amplitude und Phase homogenen elektromagnetischen Feld befinden. Eine annähernd flache Phasenfront ist dabei Voraussetzung für eine genaue quantitative Feldmessung, sie bildet sich bei einer Richtantenne in einer Entfernung von etwa:

$$>2 - 3 D^2/\lambda$$

wobei D = der horizontalen bzw. vertikalen Aperturweite
und λ = der Wellenlänge entspricht

Bei der Abmessung und Wellenlänge der TAFLIR - ULSA bildet sich die vollständige Strahlungskeule in einer Entfernung von etwa 600 Meter !

Westinghouse hatte für die Entwicklung der ULSA - Technologie ein Fernfeld - Testrange mit über 700 Meter Länge erstellen lassen. Das sehr flache auf wenige Zentimeter ausplanierte Gelände, erlaubt die Erzeugung von Strahlungsfeldern mit einer minimalen Inhomogenität welche unter einem dB liegt.



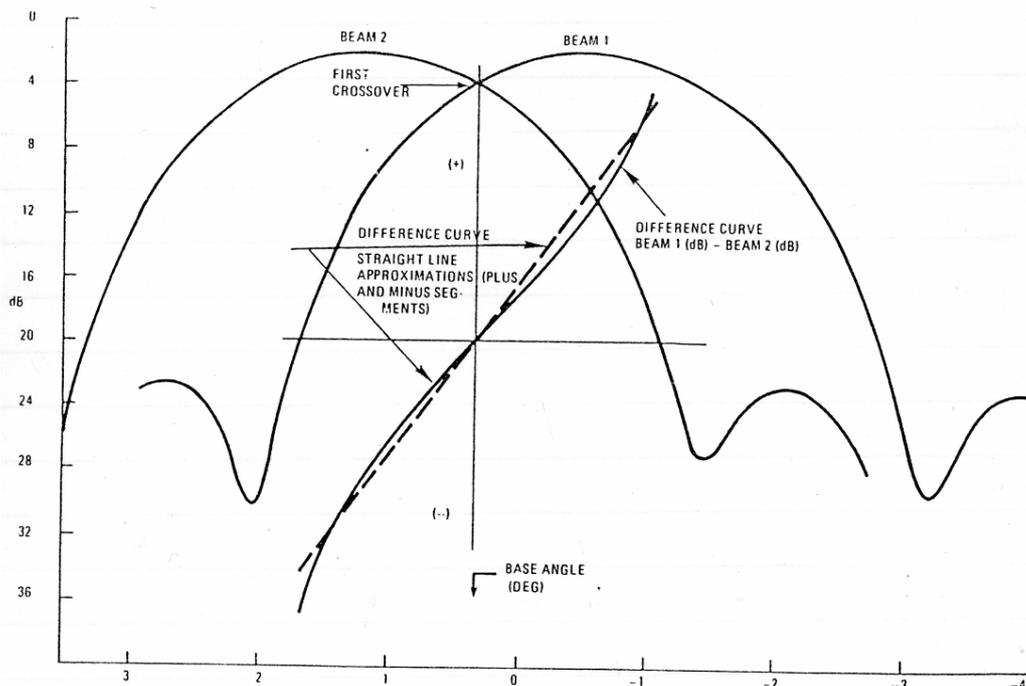
ULSA beim Vermessen auf der 4-achsigen Positionierungsausrüstung der Antennen – Testrange, der Testsender befindet sich in einer Distanz von ca. 700 Meter.



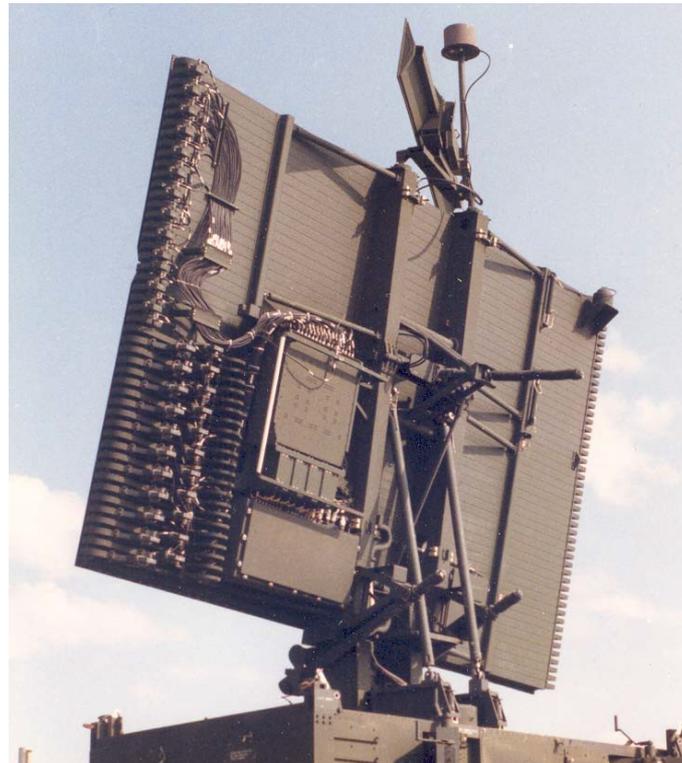
Zum Vermessen der Homogenität des Feldes wird ein Scanner (siehe Foto) verwendet mit dem der Raum sowohl in der horizontalen (siehe Bild) wie auch in der vertikalen Ebene mit einer Empfangsantenne abgetastet wird.



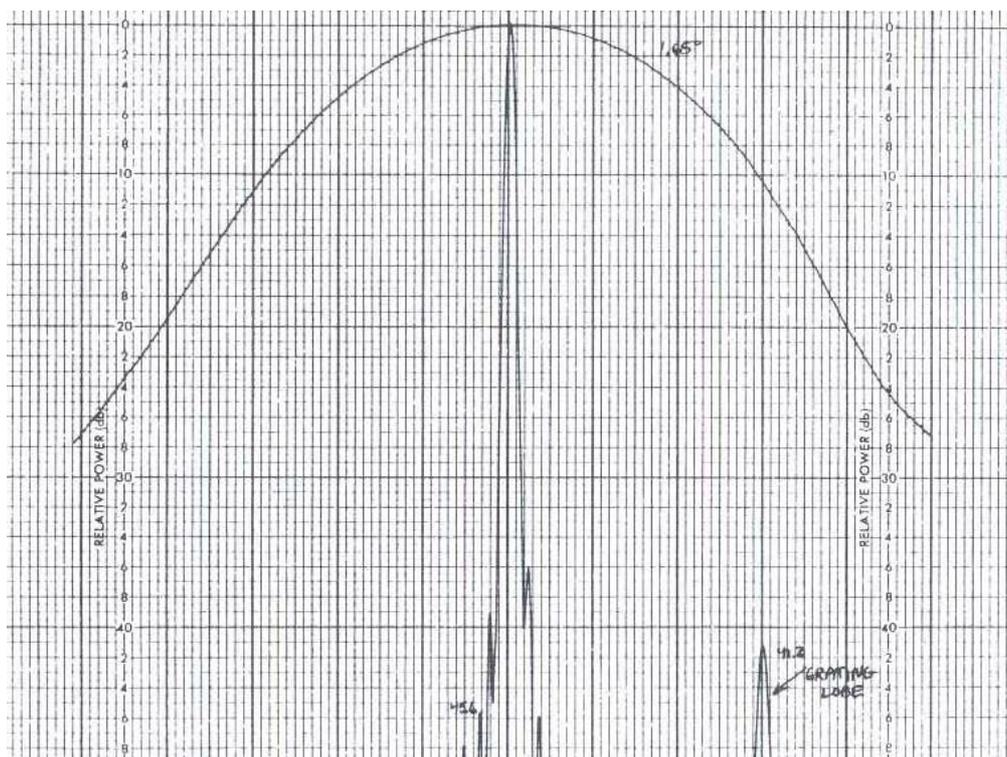
Aus der Figur ist das „Beam – Splitting“ für die Höhenberechnung der Radarziele ersichtlich. Das TAFLIR Radar berechnet die Höhe der Ziele aus einem Amplitudenvergleich der Echos auf zwei benachbarten Empfangsbeam. Für die Höhenberechnung muss die genaue Lage, Stärke und Form der Empfangsbeam – Paare unter Einbezug der LNA's und Receivers bekannt sein. Die Vermessung dieser sog. Antennen - Adaptationsdaten erfolgt für jede ULSA individuell auf dem Antennen Testrange.



Das Foto zeigt die Rückseite der TAFLIR ULSA, zuoberst im Bild ist die runde OMNI und die flache IFF Antenne zu erkennen, der quadratische Kasten in der Mitte enthält die Butler – Matrix, der rechteckige Kasten darunter die Low Noise Amplifier und die RF - Receiver



Die Figur zeigt die im Azimut wirksame ULSA - Strahlungscharakteristik der Antenne, darin zu erkennen ist, dass die ersten wirklichen „Sidelobes“ ca. -45 dB unterhalb der „Mainlobe“ liegen, auf rechten Seite erscheint um ca. 30° versetzt zur „Mainlobe“ eine „Gratinglobe“ die ebenfalls ca. 40 dB unter der „Mainlobe“ liegt



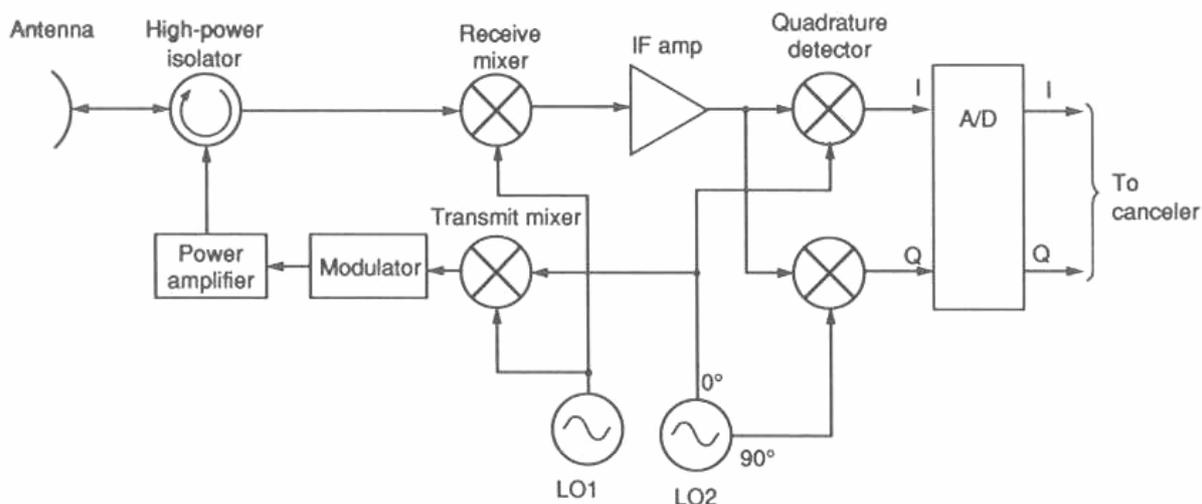
TAFLIR - Radarsender

Um in der Schweiz tief fliegende Flugzeuge über den mit starkem Bodenclutter durchsetzten Gebieten erfassen zu können, kam für das TAFLIR System nur ein Pulsdoppler System in Frage. Pulsdoppler Systeme beruhen auf einem Phasenvergleich der Zielechos über mehrere Interpulsperioden wobei davon ausgegangen wird, dass die Phasenlage der Bodenclutter - Echos konstant bleibt. Die Pulsdoppler - Verarbeitung erfordert ein vollkohärentes Sende/Empfangs - System, da Phaseninstabilitäten in der Radarverarbeitung eine unvollständige Ausfilterung des Bodenclutters zur Folge haben.

Die nachstehende Figur zeigt die Verknüpfungen bei der Frequenzerzeugung in einem phasenkohärenten Radarsystem.

Der Oszillator LO1 liefert das Basissignal für die Erzeugung der Sende- und Lokaloszillatorfrequenzen. An der Erzeugung der Sendefrequenz ist jedoch auch Oszillator LO2 beteiligt, wobei diese aus einem Mischprozess im „Transmit Mixer“ zustande kommt. Durch diese Verknüpfung wird die Phasenkohärenz bei der anschliessenden 1. und 2. Mischung erreicht.

Bei der 1. Abmischung des Empfangssignals in die IF - Frequenz wirkt LO 1 als Lokaloszillator. Bei der 2. Abmischung im Quadratur Phasendetektor erfolgt der Phasenvergleich der Echosignale mit der Referenzfrequenz des LO 2 Oszillators. Bei dieser Abmischung hinunter ins Basisband verbleibt die positive oder negative Dopplerfrequenz der Radarziele. Aus der LO 2 Frequenz welche beim TAFLIR System 30 MHz beträgt werden auch sämtliche Timing - Signale für die Radarverarbeitung abgeleitet.



Westinghouse hatte anlässlich der Feldversuche in der Schweiz mit dem AN/TPS-43 System Abklärungen bezüglich dem für die Ausfilterung des **Bodenclutters** erforderlichen „**MTI - Improvement Factor**“ durchgeführt. Dabei stellte sie fest, dass vom Radar in gewissen Gebieten Bodenclutter mit einer Ausdehnung von bis zu 43 dBm² Reflexionsfläche eingesehen wurde. Um ein über diesem Bodenclutter fliegendes Flugzeug mit 1m² Reflexionsquerschnitt zu erfassen, muss das Radar über einen „**MTI - Improvement Factor**“ von > 43 dB verfügen !

Voraussetzung dafür ist eine Gesamtstabilität im Sende/Empfangssystem die in der gleichen Grössenordnung liegt.

Die im Nachgang an die Felderprobung am AN/TPS-43 System durchgeführten Modifikationen erbrachten jedoch bei weitem nicht die gewünschten Verbesserungen.

Der Systemsarchitekt John Taylor forderte daher auch eine Neukonzeption des gesamten kohärenten Sende/Empfang - Systems mit einer Stabilität von 50 dB.

Er ging davon aus, dass sich bei einer Neukonstruktion die drei für die Stabilität wesentlichen Anteile auf die nachfolgende Werte verbessern liessen:

Frequency Generator 57 dB

Driver Amplifier 58 dB

Final Power Amplifier 52 dB

Daraus resultiert eine summierte Gesamtstabilität von 50 dB

Beim Neubau des Frequenzgenerators musste der gewünschte Frequenzbereich mit den geforderten 27 Arbeitsfrequenzen berücksichtigt werden. Da eine elegante Lösung mit indirekter Frequenzsynthese beim damaligen Stand der Technik die strengen Stabilitätsanforderungen nicht erfüllte, wurde der Weg über eine direkte Frequenzsynthese gewählt. Diese erforderte jedoch 16 einzelne STALO- (LO 1) und einen COHO- (LO 2) Oszillator.

Die LO 1 Stalo Oszillatoren für die Erzeugung der 27 Sender- und Ueberlagerer-Frequenzen mussten im Frequenzbereich um 90 MHz arbeiten um mit einer 5-fachen Frequenzverdopplung in den Bereich von 2.9 – 3.1 GHz des TAFLIR - Radars zu gelangen. Der LO 2 Coho - Oszillator der die 30 MHz Referenzfrequenz für die Ueberlagerung der ZF ins Basisband liefert, konnte vom AN/TPS-43 Radar übernommen werden, da seine Stabilität auch den Anforderungen des TAFLIR - Radars genügte.

Bei der Prüfung verschiedener Fremdfabrikate für die STALO - Oszillatoren erfüllte jedoch keines die Anforderungen an die Phasenstabilität. Westinghouse entschied sich für eine Eigenentwicklung. Im August 1982 war ein Prototyp vorhanden, bei dem das Off - Frequency Phasenrauschen (100 Hz neben Träger) bei -144 dB/Hz lag und somit einen um 15 dB tieferen Wert aufwies als die Fremdfabrikate. Damit konnte die vom Systemsarchitekten geforderte Stabilität von 57 dB für die Frequenzerzeugung knapp erreicht werden!

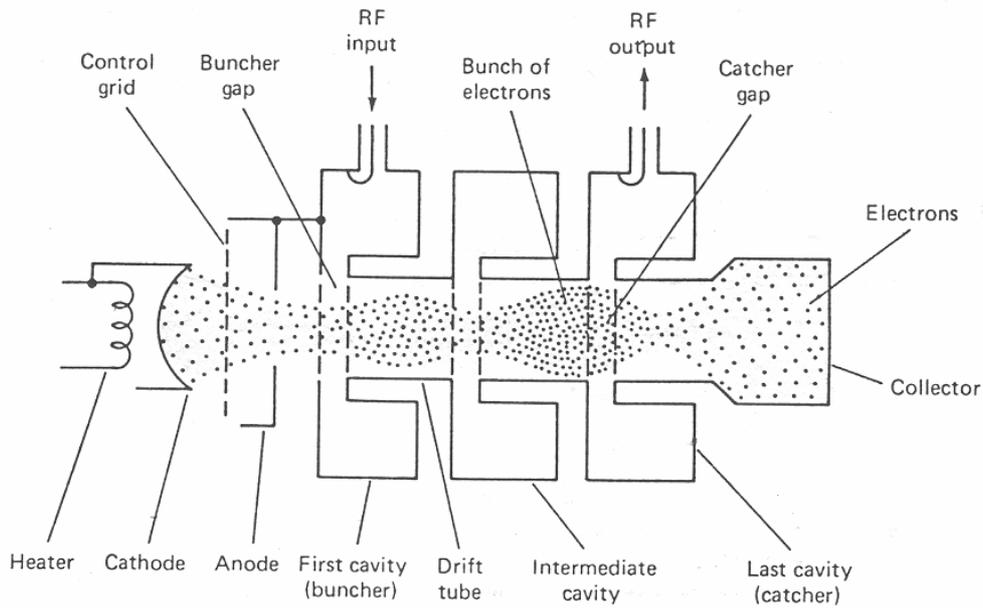
Der Wert von 57 dB ergab sich einerseits aus dem über die Bandbreite des ZF - Seitenbandes (50 Hz bis 1.2 MHz = 57 dB) integrierten Oszillatorrauschen (-144 dB/Hz + 57 dB) sowie durch das bei der 5-fachen Frequenzverdopplung der STALO - Frequenz zusätzlich anfallende Phasenrauschen von $5 \times 6 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$ (-144 dB/Hz + 57 dB + 30 dB).

Einiges Kopfzerbrechen verursachte den Entwicklungs-Ingenieuren die Stabilitätsforderung von 52 dB für den Radarsender. Für die geforderte Pulsleistung von 1.2 Megawatt, bzw. von ca. 6.5 kW mittlerer Leistung, bei einem Frequenzbereich von 2.9 – 3.1 GHz, kam eigentlich nur eine Laufzeitverstärker - Röhre für die Endstufe in Betracht. Bei den ersten Abklärungen zeigte es sich, dass bedingt durch die hohe PRF und der daraus resultierenden hohen Durchschnittsleistung eine verstärkte Ausführung der flüssigkeitsgekühlten VA-145 Varian Röhre erforderlich war.

Bei den Twystrons handelt es sich um eine Laufzeitverstärkerröhren mit relativ grosser Bandbreite. Mit Twystrons können Bandbreiten bis 15% bei einem Wirkungsgrad von ca. 20% erzielt werden.

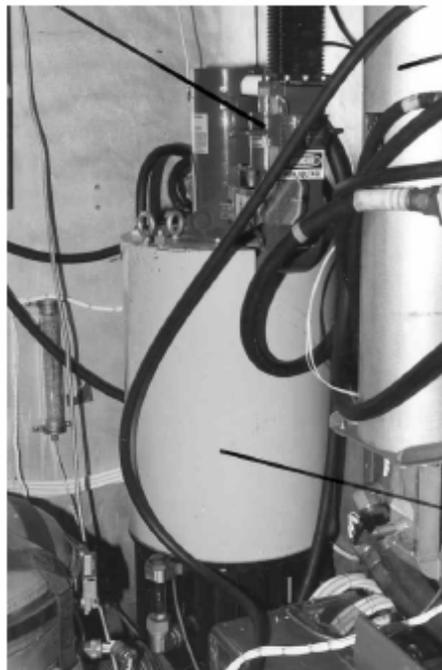
Bedingt durch die physikalische Wirkungsweise wird die Phase des verstärkten Ausgangssignales durch Aenderungen in der Collector- und Heizspannung sowie durch Aenderungen in der elektromagnetischen Fokussierung des Elektronenstrahles beeinflusst. Die Figur auf der nächsten Seite zeigt den Aufbau einer Laufzeitverstärker-röhre wie sie für die Leistungsverstärkung im Radarsender des TAFLIR Systems zur Anwendung kommt.

Der zylindrische Röhrenkörper ist dabei von der Spule für die elektromagnetische Fokussierung des Elektronenstrahles umgeben. Die Speisung der Spule erfolgt aus einer Konstantstromquelle (beim TAFLIR Sender 200 Volt ca. 10 Ampere). Bei dem im TAFLIR Sender verwendeten VA-145T Twystron beträgt die Phasenempfindlichkeit bei einer Collector - Spannung von 110 kV ca. 14° pro kV Spannungsänderung.



VA-145T TWYSTRON im TAFLIR Prototyp

TWYSTRON mit Wellenleiterauskopplung

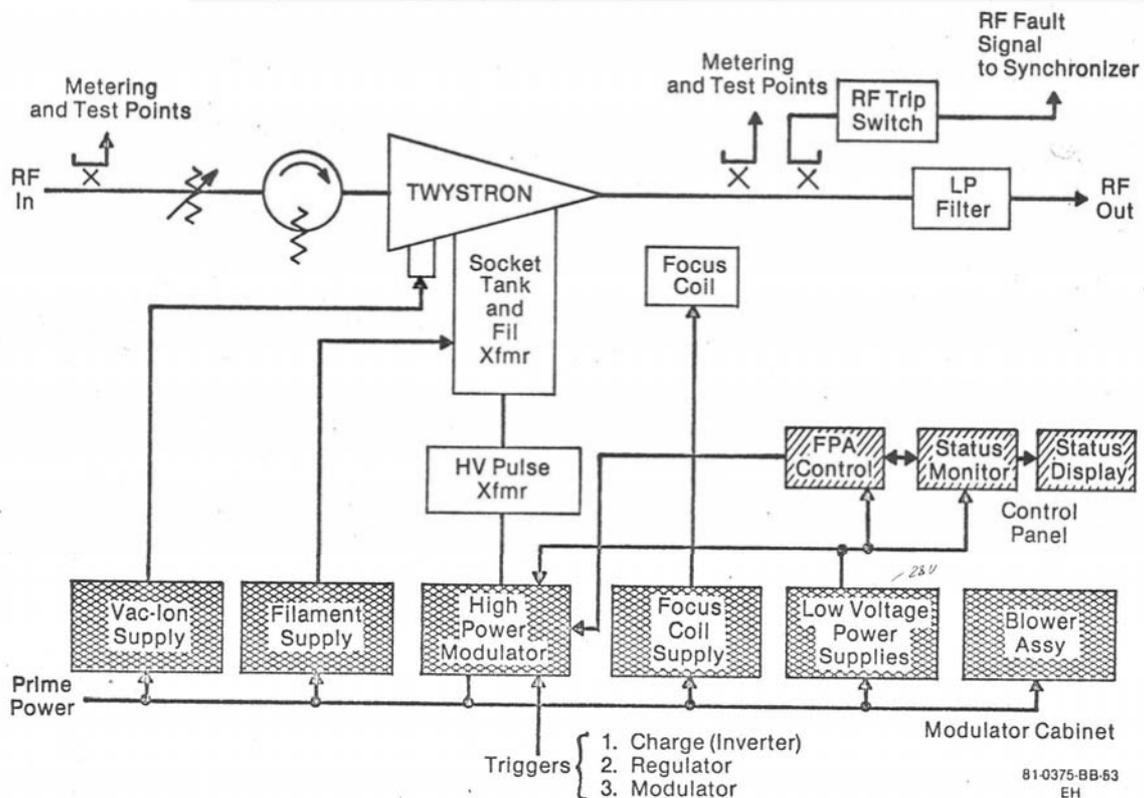


Harmonischen - Filter im Ausgang zur Antenne

Flüssigkeitsgekühlte Fokussier Spule

Impulstransformator im Druckgefäß

Das Sendersignal wird nach der Erzeugung aus der Stalo- und Coho-Frequenz im Frequenzgenerator in einem TWT - Röhrenverstärker auf eine Pulsleistung von ca. 2.5 kW gebracht. Dieses Signal gelangt über den RF - Input in die Twystron Endstufe des Senders. Wie aus dem Blockschema hervorgeht ist für den Betrieb der Twystron-Röhre neben den Power Supplies für die Heizung sowie den Speisungen der magnetischen Fokussierung und der Ionen - Vakuumpumpe ein Hochleistungs-Modulator für die Erzeugung des Tastimpulses erforderlich.

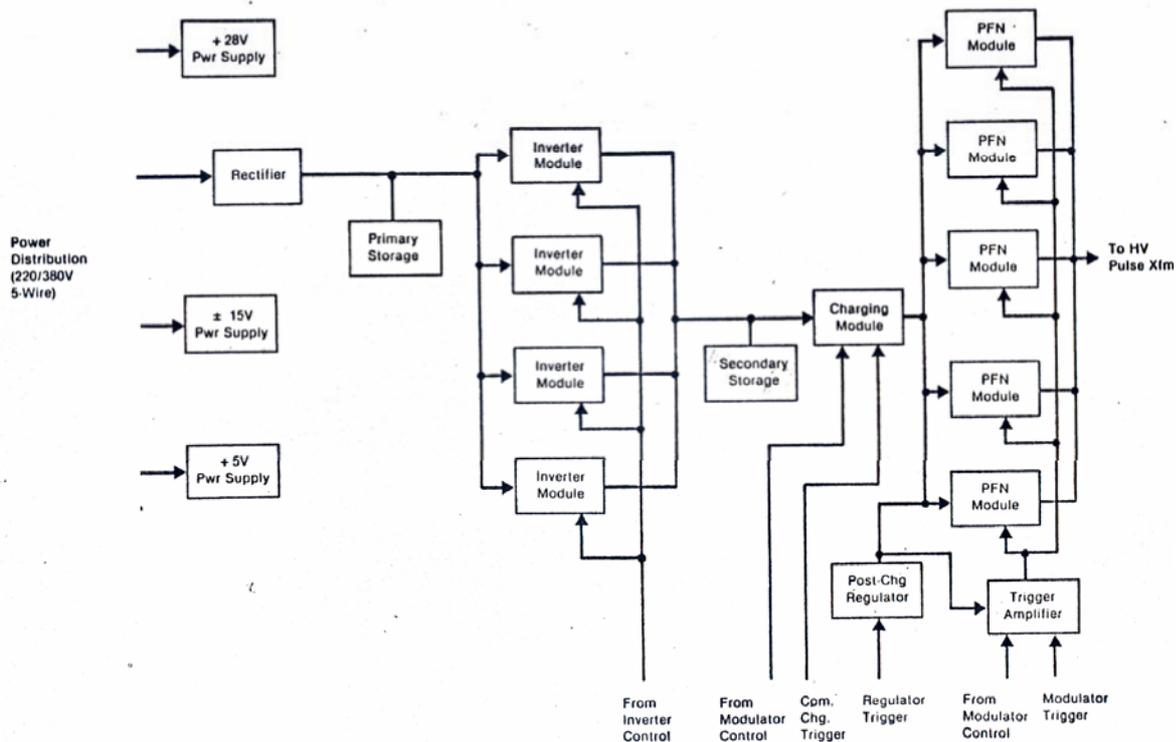


Zum Abführen der in der Twystron Röhre entstehenden Verlustleistung welche in der Größenordnung von 50 kW liegt, ist ein Flüssigkeitskühlsystem erforderlich. Das in der Twystron-Röhre auf ca. 1.2 Megawatt verstärkte Sendersignal wird über einen Low Pass Filter und die Drehkupplung zur Antenne geführt. Zur Steuerung und Ueberwachung der Senderendstufe ist zudem ein aufwendiges Sicherheitssystem erforderlich.

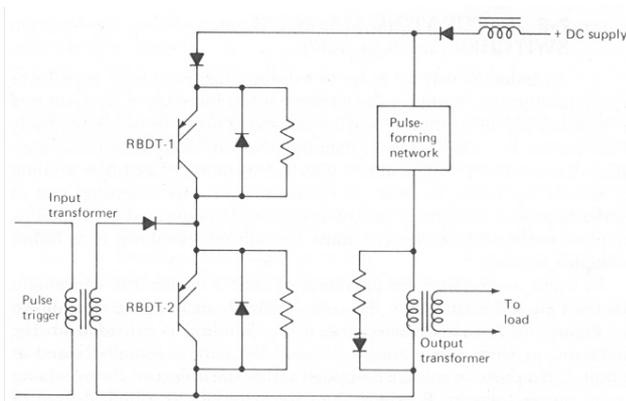
Der High Power Modulator für die Erzeugung des Tastimpulses für die Twystron Endstufe des Senders wird aus dem 240/400 Volt 50 Hz Netz versorgt. Nach der 6-Phasen-Gleichrichtung gelangt die 500 Volt Gleichspannung in die primäre Energiespeichereinheit von 2000 Joules Speicherkapazität. Anschliessend wird die Gleichspannung in vier parallel arbeitenden 9 kHz Halbleiter - Schaltnetzteilen auf ca. 1440 Volt erhöht. Diese Gleichspannung gelangt in die sekundäre Energiespeichereinheit von 150 Joules Speicherkapazität. Ueber die Charging - Unit erfolgt die Ladung von fünf parallelen Pulse Forming Network (PFN's). Die Charging Unit enthält eine Ladedrossel die zusammen mit den Speicherkapazitäten der PFN's eine Serieresonanz bilden. Die dabei auftretende Resonanzüberhöhung bewirkt praktisch eine Verdoppelung der Ladespannung auf ca. 2700 Volt.

Die Pulse Forming Networks die zur Energiespeicherung und zur Erzeugung des Tastimpulses von ca. 4.5 μ s Dauer dienen, weisen eine Impedanz von lediglich 1.25 Ohm bzw. 0.25 Ohm im Parallelbetrieb auf.

Modulator Diagram



Auf Grund der relativ tiefen Sperrspannung der Halbleiter - Schalter für deren Entladung, kann die im TAFLIR - System erforderliche hohe Sendeleistung nur mit grossen Strömen erreicht werden. Diese betragen einige tausend Ampere. Die in den PFN's vor der Entladung gespeicherte Energie beträgt ca. 35 Joules.



Als Halbleiter - Schalter kommen sog. „Reversed Diode Blocking Transistors“ (RBDT's) zur Anwendung welche kurze Schaltzeiten (di/dt Werte von $3000 \text{ A}/\mu\text{s}$) aufweisen und damit die erwünschten steilen Anstiegsflanken der Tastimpulse ermöglichen.

Bei der Entladung der fünf parallelen PFN - Module in die Primärwicklung des Pulstransformators (siehe Foto auf der nächsten Seite) wird sekundärseitig ein Tastimpuls von ca. 110 kV induziert. Der negativ gerichtete Impulse wird an die Kathode der Twystron - Röhre gelegt und erzeugt darin, mit den in den PFN's gespeicherten 35 Joules, während $4.5 \mu\text{s}$ einen Elektronenstrom von ca. 70 Ampere. Der magnetisch fokussierte Elektronenstrom wird durch das am Eingang der Twystron-Röhre liegende Mikrowellensignal von $3.25 \mu\text{s}$ mit der Sendefrequenz moduliert.

Der 3.25 μ s Mikrowellen Impuls erscheint um ca. 27 dB verstärkt mit 1.2 Megawatt Leistung an der Ausgangsstufe des Twystrons. Der Energieinhalt des Sendepulses beträgt infolge des tiefen Wirkungsgrades der Röhre nur ca. 4 Joules.

Zur Vermeidung von elektrischen Entladungen bei den hohen Spannungen an der Sekundärwicklung befindet sich der Impulstransformator welcher ein Uebersetzungsverhältnis von 1 : 84 aufweist, in einem mit Stickstoff gefüllten Gefäss unter Druck von 1 Bar.



Um beim TAFLIR - Sender die geforderte Stabilität von 52 dB zu erreichen ist es erforderlich, dass während dem 9 Puls Zyklus der BAM Doppler Verarbeitung die Scheitelspannung der Tastimpulse innerhalb 0.020% konstant gehalten wird.

Dies wird zur Hauptsache mit den sehr grossen primären und sekundären Energiespeichern erreicht. Zusätzlich ist jedoch noch ein elektronischer Regelkreis (**Post Charge Regulator**) vorhanden, welcher die Schwankungen der Endspannung bei der PFN Aufladung um weitere 10 dB reduziert.

Während dem Zyklus der Dopplerverarbeitung dürfen die Spannungsschwankungen der an der Kathode des Twystron anliegenden -110 kV Tastimpulse 20 Volt nicht übersteigen !

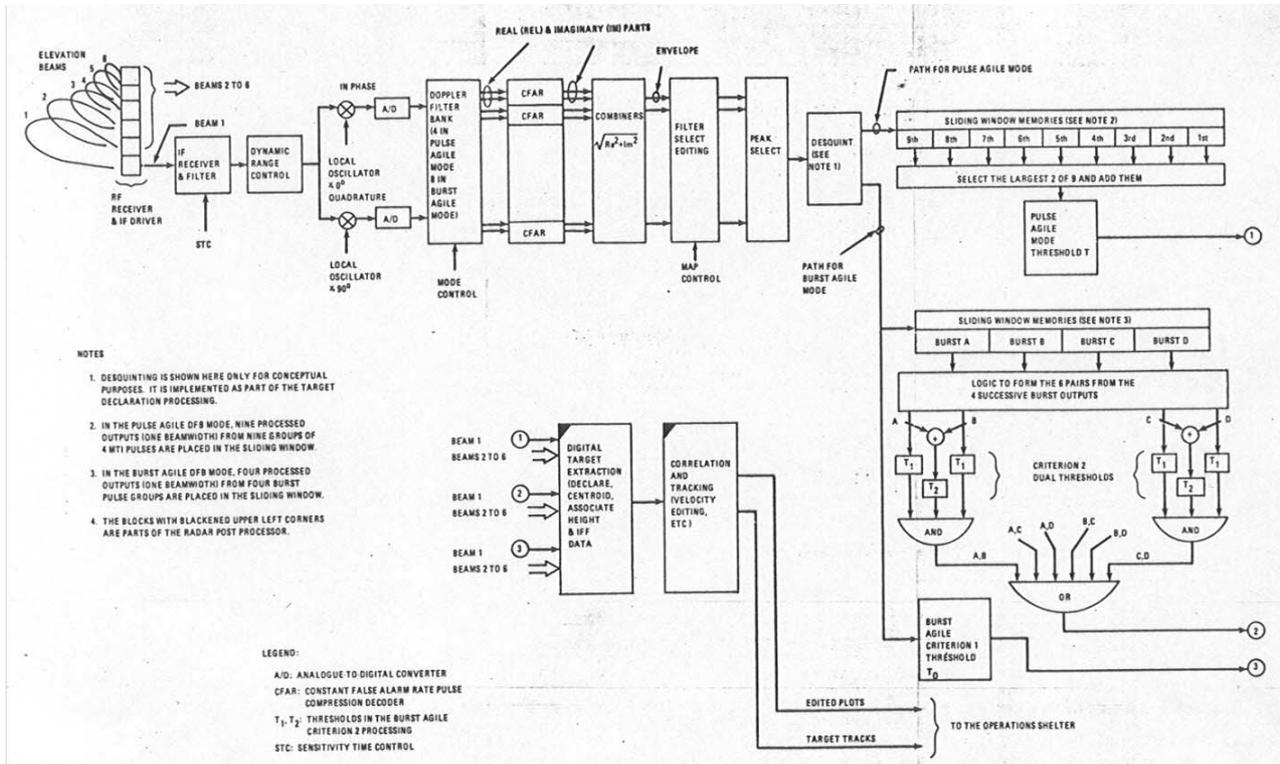
Weiterverarbeitung der Radarempfangs - Information

Die am Ausgang des Quadratur - Phasendetektors anfallenden I und Q Signalkomponenten gelangen in den A/D Wandler und werden dort digitalisiert. Die digitalisierte Information gelangt anschliessend in die digitale Dopplerfilterung.

Durch die Multiplikation der I und Q Komponenten mit den gespeicherten Filterquotienten in einem schnellen Digital Signal Processor (DSP) werden die Stützwerte für die verschiedenen Filterkurven des Pulse Agile Mode (PAM) oder des Burst Agile Mode (BAM) berechnet.

Diejenigen Filter welche die niedrigsten Dopplerfrequenzen und somit den Bodenclutter enthalten werden durch **eine sich stetig an die Standzeichen adaptierende dreidimensionale Standzeichen Karte (sog. Filter Map)** ausgetastet.

Die Figur zeigt die weitere Verarbeitung der Radarempfangssignale nach dem IF - Verstärker. Die I und Q Komponenten werden im A/D Wandler digitalisiert und gelangen anschliessend in die digitale Dopplerfilterung.



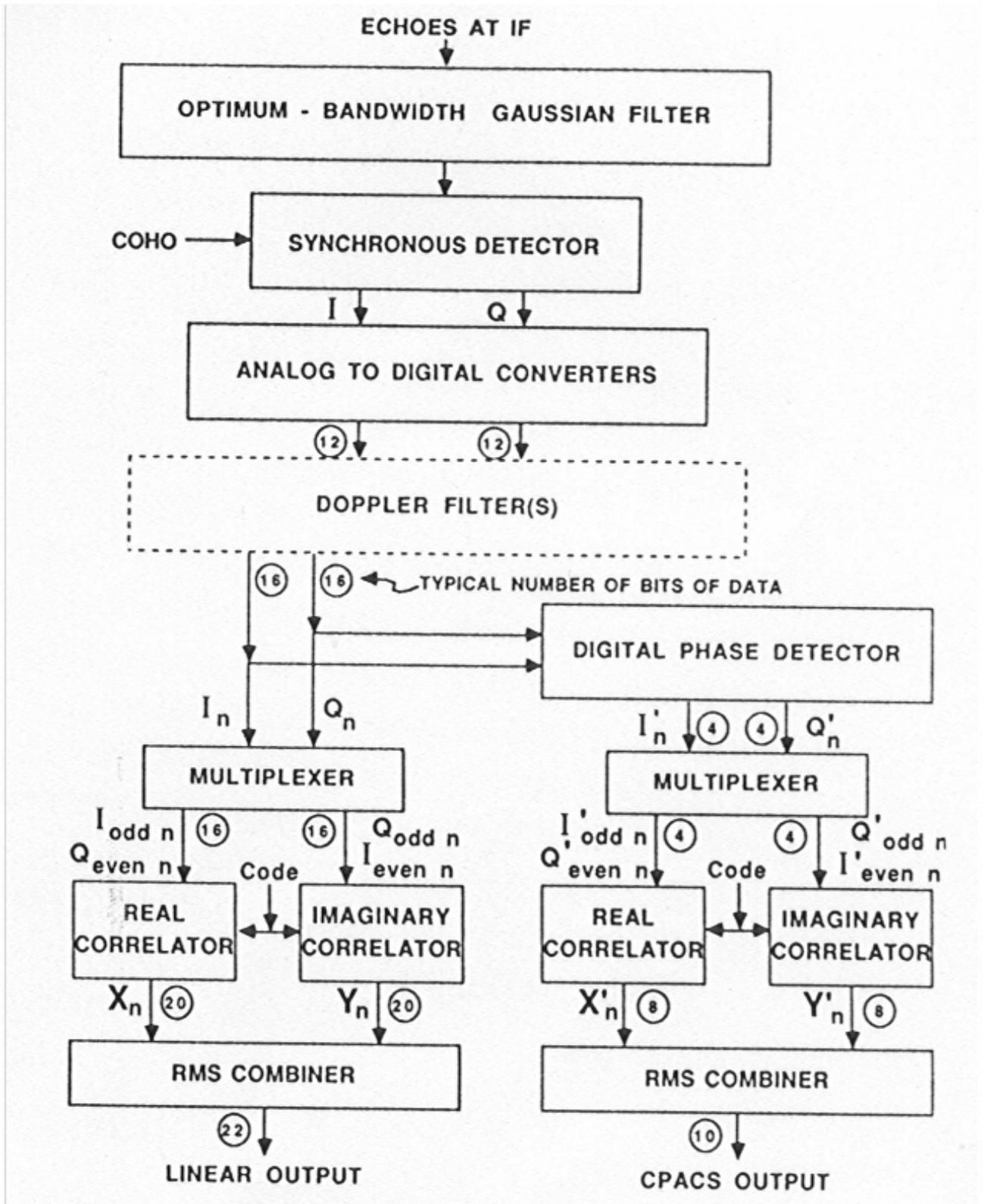
Das militärische Pflichtenheft für das TAFLIR System, forderte eine Entdeckungswahrscheinlichkeit von 80% für ein in 100 km Entfernung befindliches F-5E Flugzeug.

Mit der auf 1.2 Megawatt beschränkten Spitzenleistung des Senders musste eine Pulslänge von 3.25 μ s gewählt werden um genügend Energie auf das Ziel zu strahlen. Um trotzdem die geforderte Entfernungsauflösung der Ziele zu erreichen war daher ein Pulskompression - Verfahren erforderlich.

Für eine Pulskompression ist es erforderlich die Sendeimpulse mit einer weiteren Information zu modulieren. Beim TAFLIR System wurde das von John Taylor entwickelte¹²⁾ Verfahren mit einem Quadraturphasen – Code angewendet. Der Sendeimpuls wird hierbei in 13 Subimpulse von je 0.25 μ s Dauer unterteilt. Jeder Subimpuls kann, abhängig vom verwendeten Code, eine der vier Phasenlagen: 0°, 90°, 180° oder 270° aufweisen. Bei der **Fourier Transformation** vom Frequenz- in den Zeitbereich entstehen physikalisch bedingte „Time – Sidelobe“. Durch eine geschickte Wahl des verwendeten Phasencode – Musters kann dieser Effekt jedoch reduziert werden. Beim TAFLIR wurde ein sog. „13 Bit Barker - Code“ verwendet, bei dem die Time - Sidelobes der komprimierten Impulse um ca. 22 dB abgeschwächt erscheinen.

Die Figur auf der nächsten Seite zeigt nochmals den Verarbeitungsweg der Echosignale unter Berücksichtigung der Impulskompression. Der IF - Empfänger weist eine für den Sendeimpuls optimale Bandbreite auf und ist mit der Gauss'sche Charakteristik der IF - Filter an die Subimpulse des Quadratur Phasencode der Impulskompression angepasst.

Nach der Ueberlagerung des IF - Signals ins Basisband und der Phasendetektion wird der Real- und der Imaginäranteil (I und Q Signal) im 12 Bit A/D Wandler digitalisiert. In der anschliessenden digitalen Doppler Filterung werden die Cluttersignale ausgeschieden. Die Dekodierung des Quadratur Phasencodes erfolgt durch eine Korrelation der Real- und Imaginäranteile des Zielechos mit dem ausgesendeten Code. Der lineare Output wird für die Höhenvermessung der Zielechos und der sog. „**Coded Pulse Anticlutter (CPACS)**“ Output für die Detektion der Ziele verwendet.



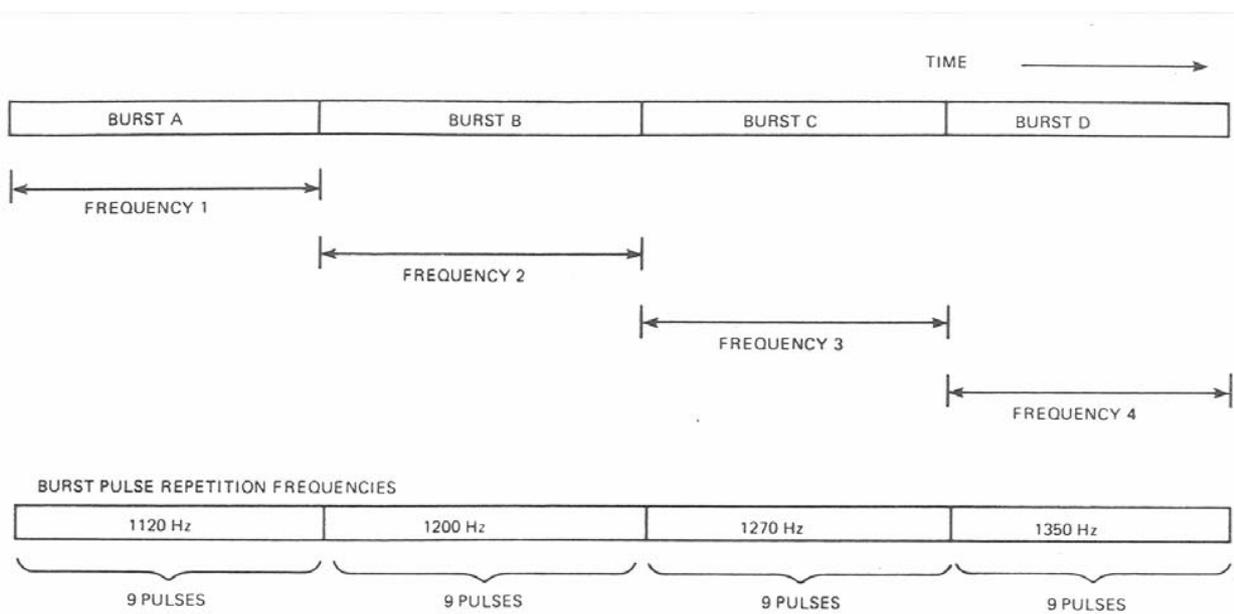
Der Westinghouse Radararchitekt John Taylor hatte der von ihm entwickelten Puls-kompression die Bezeichnung **Coded Pulse Anticlutler System (CPACS)** gegeben, weil mit dem Verfahren nur Echos verarbeitet werden deren Phasenmuster mit dem eigenen ausgesendeten Phasencode übereinstimmen. Interferenzsignale fremder Radars oder Störer werden vom CPACS weitgehend ignoriert und Standzeichen sowie durch Niederschläge oder „Chaff“ hervorgerufene Echos, welche sich in die benachbarten Verarbeitungsintervalle des CPACS erstrecken, erheblich abgeschwächt.

Obgleich grundsätzlich die komprimierte Impulslänge und der Oeffnungswinkel der Strahlungskeule die Auflösung von zwei Punktzielen bestimmen, wird die effektive erreichte Auflösung durch die Verarbeitung im „**Constant False Alarm Receiver (CFAR)**“ beeinflusst. Benachbarte Ziele welche sich ausserhalb dieser Zone befinden werden in der Auflösung nicht beeinträchtigt. Innerhalb dieser Zone kann die Auflösung, abhängig von der Stärke des benachbarten Zieles, jedoch reduziert werden. Diese Einschränkung gilt auch für benachbarte Ziele die durch Standzeichen hervorge-rufen werden welche zu stark sind um von der Dopplerfilterung eliminiert zu werden.

Das TAFLIR - System kann daher Ziele, mit identischem Radarquerschnitt welche um die komprimierte Pulslänge oder 1.7° voneinander separiert sind, nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 65% aufzulösen.

Bei der Konzeption des TAFLIR - Systems ging Westinghouse davon aus, dass 1 m² Ziele über Standzeichengebieten mit 43 dBm² Rückstrahlfläche mit 80% Wahrscheinlichkeit detektiert werden können. Bei der Dopplerverarbeitung sollten dabei Blindgeschwindigkeiten für Radialgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 50 und 1400 km/h vermieden werden.

Für die Detektion von Zielen über Standzeichengebieten bei Regen oder „Chaff“ ist der sog. Burst Agile Mode (BAM) vorgesehen. Im BAM werden die Ziele nacheinander mit je 9 Transmissionen auf vier unterschiedlichen Frequenzen und mit vier verschieden PRF's angestrahlt. Die Dopplerverarbeitung erfolgt in 8 Filtern.



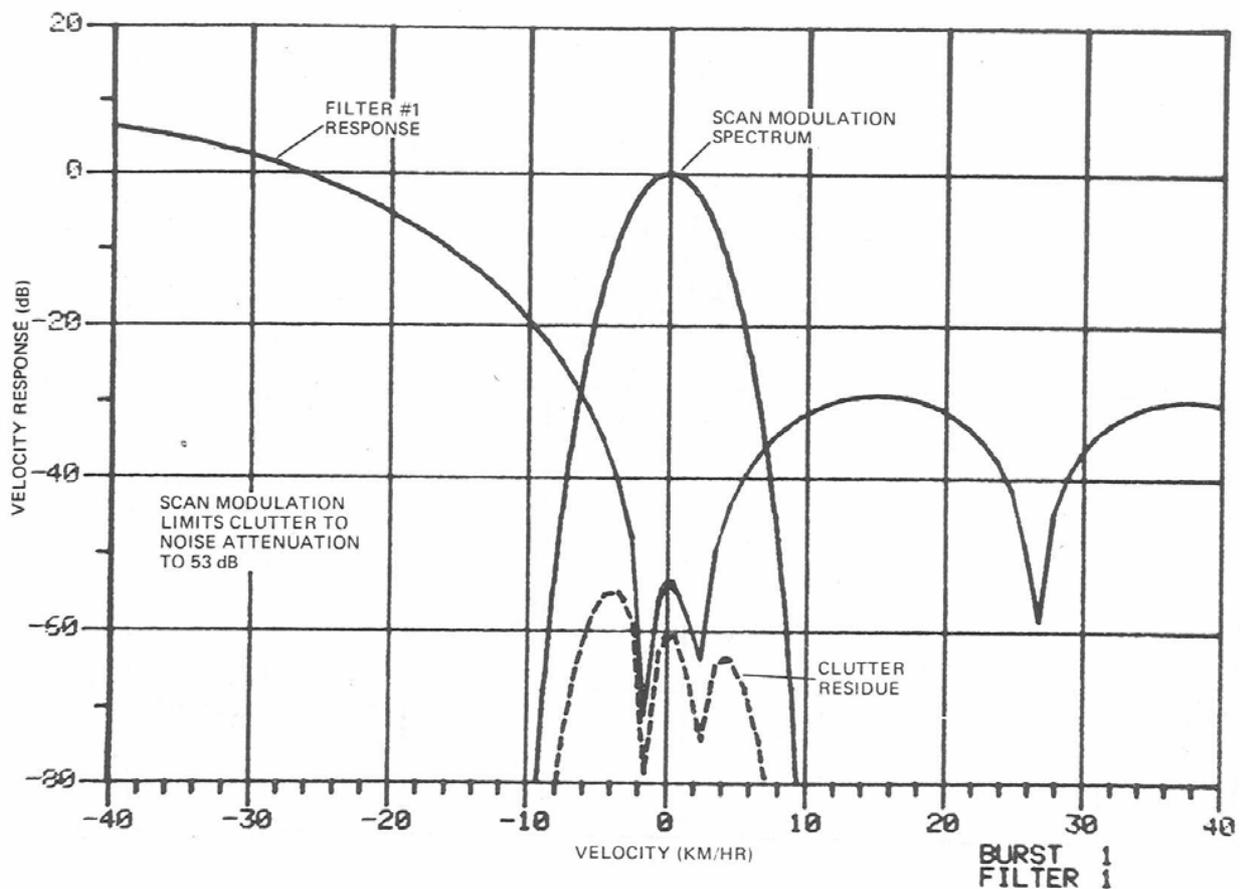
NOTE: 10 PULSES PER BURST IS ALSO AVAILABLE, IF SELECTED.

80-0657-V-44

Die Antennenumdrehungszahl von 10 U/min und die Beambreite von 1.7° sind derart aufeinander abgestimmt, dass die „**dwell time on target**“ genügt um das Ziel bei jeder Antennenumdrehung mit einer ganzen BAM - Sequenz zu treffen. Während der Zeit in der sich die Antennenkeule über das Ziel bewegt wird dieses mit vier verschiedenen Frequenzen und PRF's von je 9 Transmissionen angestrahlt. Durch die vier unterschiedlichen PRF's wird das Blindgeschwindigkeitsproblem weitgehend eliminiert. Wenn sich ein Flugzeug bei einer PRF im Blindgeschwindigkeitsbereich befindet kann es von einer oder mehreren der drei übrigen detektiert werden. Der BAM ist durch seine Dopplerverarbeitung in 8 verschiedenen Filtern speziell für eine Detektion von Zielen geeignet welche sich in Regen- oder „Chaff“ - Gebieten befinden.

Im BAM werden 8 Dopplerfilter verwendet welche symmetrisch verteilt auf beiden Seiten der Trägerfrequenz liegen. Sie weisen identische Formen auf und überdecken den halben Frequenzbereich der PRF. Die digitalen Filter existieren nicht physisch, deren Stützwerte werden durch die Multiplikation der im Programm des DSP gespeicherten Filterquotienten mit den Real- und Imaginäranteilen der Zielechos laufend berechnet.

Im BAM werden über Clutter - Gebieten 6 Filter für den Dopplerbereich der bewegten Ziele benützt. Die Filter 0 welche den Bodenclutter enthalten und symmetrisch zum Träger liegen, werden zur Unterdrückung durch die Clutter Map ausgeschaltet. Die in der Figur ersichtlichen Clutter - Residuen welche zum Teil auch noch in die Filter 1 eindringen, werden durch die sog. Scan Modulation der drehenden Antenne verursacht.

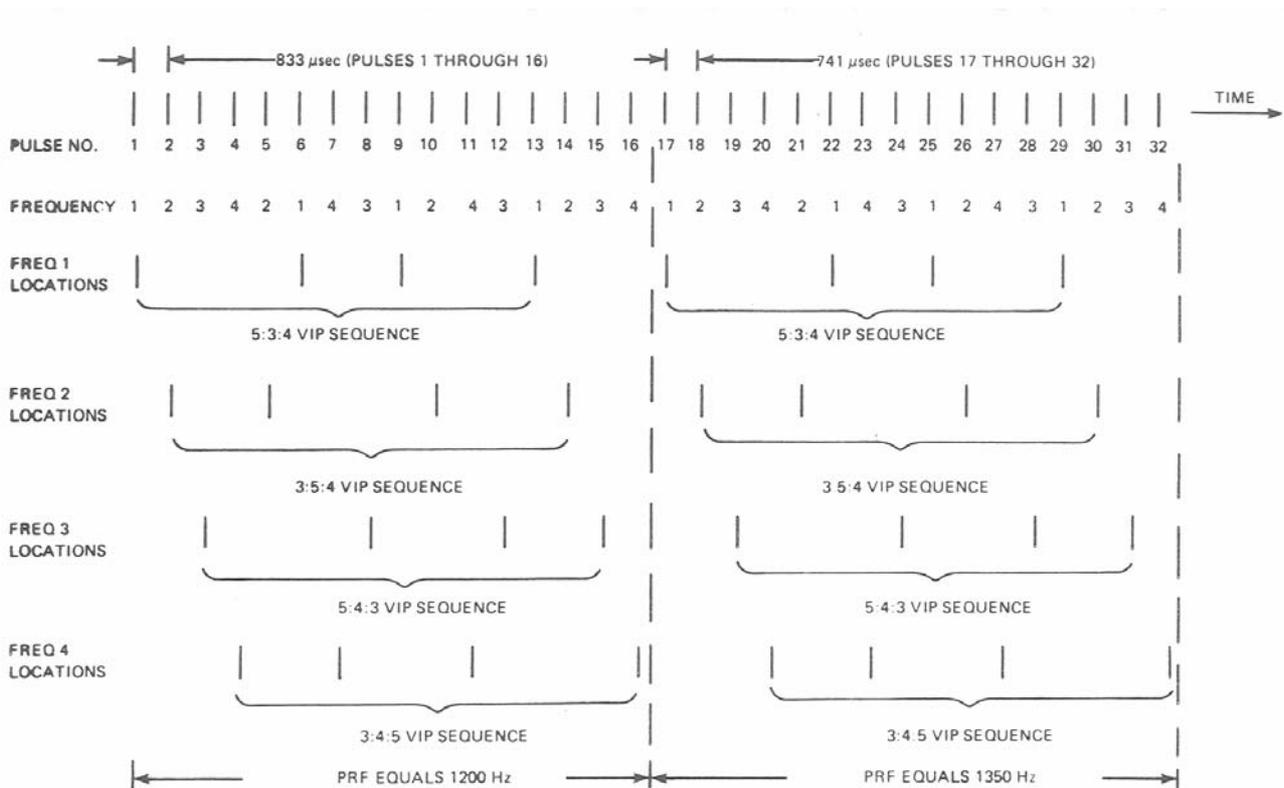


80-0657-VA-69

Für die Detektion von Zielen bei aktiven elektronischen Störungen über Standzeichengebieten ist der sog. Pulse Agile Mode (PAM) vorgesehen. Beim PAM ändert die Frequenz von Puls zu Puls wobei nur jede vierte Transmission dieselbe Frequenz aufweist. Die Doppler Filterung erfolgt im Unterschied zum BAM in vier statt in acht Filtern und ist daher in der Wirkung etwas reduziert.

Beim Pulse Agile Mode (PAM) ändert die Sendefrequenz von Puls zu Puls. Die Frequenzwahl erfolgt mit einem „Pseudo – Random“ Verfahren aus den 27 zur Verfügung stehenden Arbeitsfrequenzen.

Um trotzdem eine Dopplerfilterung zu ermöglichen muss jede ausgewählte Frequenz viermal innerhalb einer Sequenz von 16 Transmissionen wiederholt werden. Die vier Echos der gleichen Frequenz gelangen in eine aus vier Filtern bestehende Dopplerverarbeitung.



Wie aus der Figur weiter hervorgeht variiert beim PAM dauernd die Anzahl der Interpuls - Perioden zwischen den Echos gleicher Frequenz. Hierdurch ändert sich die Dauer der in einer Sequenz benützten Interpuls - Periode gegenüber der nächsten um ca. 12%. Durch das dauernde ändern der Impuls-Perioden wird das Auftreten von Blindgeschwindigkeiten vermieden.

Da der Umstand, dass sich die gleichen Frequenzen erst nach drei bis fünf Interpuls - Perioden wiederholen, von einem feindlichen Störer nicht ohne weiteres erkannt werden kann, macht diesen Mode speziell als Massnahme gegen aktive Störungen geeignet.

Massnahmen gegen elektronische Störungen

Zu Beginn der achtziger Jahre war man davon ausgegangen, dass ein Bordstörer in der Lage war eine effektive Leistung (ERP) von ca. 10 kW auszustrahlen. Bei einer Konzentration dieser Leistung auf ein Frequenzband von 20 MHz hat die daraus resultierende spektrale Leistungsdichte von 500 Watt/MHz auch bei einem Rundsuchradar mit ULSA eine verheerende Auswirkung.

Bei einem im PAM arbeitenden Radar ist der Störer jedoch gezwungen seine Leistung über 200 MHz zu verteilen. Mit der spektralen Leistungsdichte von 50 Watt/MHz sind bei einem Rundsuchradar mit ULSA jedoch kaum mehr Seitenkeulen - Störungen zu erwarten.

Als weitere Massnahme gegen aktive elektronische Störungen wurde für das TAFLIR - Radar die **Jamming Analysis Transmission Selection (JATS)** vorgesehen. Hierbei wird über die auf der ULSA aufgebaute Omni - Antenne, welche über eine Rundstrahlungs-Charakteristik verfügt, stetig die im Frequenzband von 2700 – 2900 MHz in der Umgebung der Arbeitsfrequenz auftretende Interferenz - Situation analysiert. Bei der Auswahl der Sendefrequenzen werden diejenigen Frequenzen berücksichtigt welche am wenigsten gestört sind. Um einer Störung durch benachbarte Radars vorzubeugen, können durch eine manuelle Vorwahl auch einzelne Frequenzen gesperrt werden.

Bereits zu Beginn der Evaluation des TAFLIR Radars stand sowohl für die schweizerische Beschaffungsinstanz wie auch für die konkurrierenden Firmen fest, dass die vom System geforderte Vielfalt an Leistungen sich nur unter Einsatz eines Computer Systems lösen liess. Die Lösungsvorschläge der beiden Konkurrenten wiesen allerdings erhebliche Unterschiede auf.

Mikroprozessor - Konzept anstelle von Zentralrechner beim TAFLIR

Während das System der **Firma Hughes** in Analogie zum seinerzeitigen Florida-System auf dem Einsatz eines zentralen Computers basierte, sah **Westinghouse** eine Aufteilung der Rechnerfunktion in ein **Netzwerk mit 13 Mikroprozessoren** vor. Zur Bewältigung von Aufgaben welche zum Teil sehr schnelle Rechenprozesse erforderten, wie z.B. für die Berechnung der Dopplerfilterung sowie der zeitkritischen Korrelationen bei der Zieldetektion verwendete Westinghouse **Digital Signal Processor (DSP)** zum Erreichen der geforderten Geschwindigkeit.

5 Volt Stromversorgung

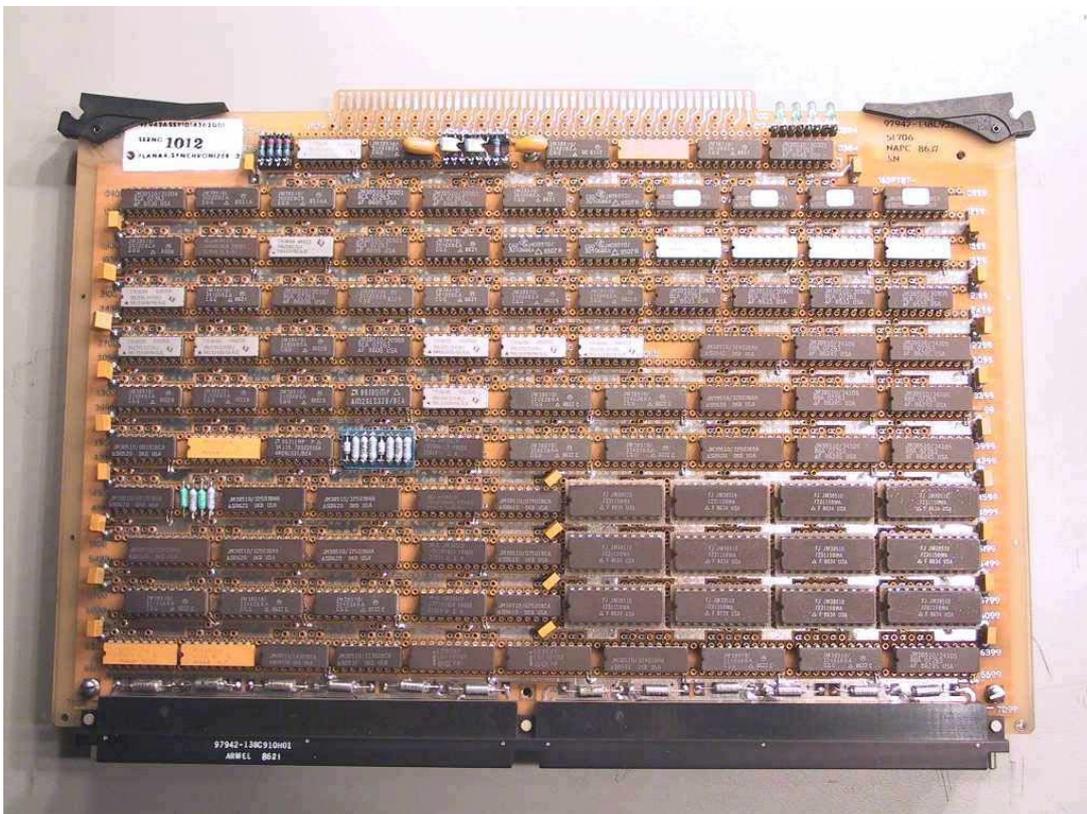
Bei der Entwicklung des TAFLIR System ergab sich für die 5 Volt Versorgung der mit TTL - Logik arbeitenden Signalverarbeitung ein erstaunlich **hoher Gesamtstrombedarf von ca. 4000 Ampere**. Um den erforderlichen Nutzsignal/Störsignal Abstand im komplexen digitalen System sicherzustellen, musste die Speisung sämtlicher TTL – Schaltkreise strickte mit 4.75 – 5.25 Volt erfolgen. Durch eine Aufteilung der 5 Volt Versorgung auf **10 parallele Netzgeräte von je 400 Ampere** und Zuleitungskabel zu den Sammelschienen mit hohem Kupferquerschnitt konnte die Impedanz der Stromversorgung auf den geforderten niedrigen Wert reduziert werden. Die im Signalprozessor in Wärme umgesetzte Verlustleistung von ca. 20 kW konnte nur mit einer forcierten Luftkühlung an die Aussenluft abgeführt werden.

Die Herstellung von zuverlässig arbeitenden 5 Volt Netzgeräten für Ströme von 400 Ampere setzte zu Beginn der achtziger Jahren noch ein hohes Mass an „know how“ voraus, das nur bei wenigen hochspezialisierten Firmen vorhanden war.

Westinghouse beauftragte die in Cedar Knolls New Jersey ansässige Firma **Transistor Devices Incorporated** mit der Entwicklung und der Herstellung dieser anspruchsvollen im „remote sensing“ Betrieb arbeitenden 5 Volt Stromversorgung.

Die Firma Transistor Devices wählte als Lösung einen Schaltnetzteil (**switched power supply**) mit hohem Wirkungsgrad welcher mit einer Schaltfrequenz von 20 kHz arbeitete. Als Schalter kamen dabei erstmalig die kurz vorher auf dem Markt erschienenen **2N6770 MOSFET - Leistungstransistoren** zur Anwendung. Die TTL - Logik benötigt für die einwandfreie Funktion eine Versorgungsspannung von 4.75 – 5.25 Volt. Um diese Forderung zu erfüllen musste die Stromverteilung sehr sorgfältig geplant werden. Die Netzgeräte mussten zudem über eine sehr genau arbeitende „remote sensing“ - Spannungsstabilisierung verfügen.

Das nachstehende Foto zeigt eine mit TTL - Logikkreisen bestückte typische Schaltungskarte wie sie im TAFLIR Signalprozessor in grosser Zahl zur Anwendung kamen.



Digital Signal Prozessoren (DSP) für Doppler Filter

Für die Berechnung der Stützpunkte bei der digitalen Dopplerfilterung wurden Digital Signal Prozessoren (DSP) in Form von **12 Bit Accumulator - Multiplier** verwendet. Diese Rechenwerke welche arithmetische und logische Operationen mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit ausführen können, waren zu Beginn der achtziger Jahre unter der Bezeichnung **TRW1009-3** neu auf dem Markt erschienen. Der Multiplikationsprozess erfolgt für jeden Subimpuls und für jeden Filter mit einem zeitlichen Abstand von 250 Nanosekunden. Bei den Filter - Quotienten handelt es sich um feste Werte welche für jeden Filter und jede PRF im System in einem Festwertspeicher abgelegt sind und bei der Berechnung vom DSP abgerufen werden.

Der Filter 0 und sein Komplementärfilter welche für die Unterdrückung der Standzeichen benützt werden, sind für den Gleichstromanteil des Dopplersignals durchlässig.

Dieser Umstand bedingte, dass der Gleichstrompegel des Phasendetektors sowie des anschliessenden gleichstromgekoppelten Videoverstärkers und des A/D Wandlers dauernd überwacht und mit Servokreis automatisch konstantgehalten werden muss. Eine Verschiebung des Gleichstrompegels hätte eine schwerwiegende Degradation der Dopplerfilterung zur Folge.

Weitere Servokreise sind für die Ueberwachung und Nachregelung des Phasen- und Amplitudenganges im Bereich Phasendetektor, Videoverstärker und A/D Wandler vorhanden. Als Referenzsignale für die Servokreise wird ein während der Radar - Totzeit in die Radarantenne eingeführtes Testziel verwendet. Das Testziel gelangt über die Phasendetektoren in die A/D Wandler und wird in digitaler Form ausgewertet und zur Nachregelung der Servokreise verwendet.

Ohne diese automatische Ueberwachung und Nachregelung der sieben parallelen Empfangskanäle wäre ein zuverlässiger Betrieb des komplexen „stacked beam“ Radars nicht möglich. Abweichungen im Verhalten der einzelnen Empfangskanäle würden sich unmittelbar als Fehler in der Höhenvermessung der Radarziele auswirken.

Antennen Antriebssystem

Für die Konstruktion und die Herstellung des Antriebs- und Drehlagerungssystem für die Radarantenne beauftragte Westinghouse die in **Clearwater (FL) ansässige Firma ABA**.

Das Gewicht des aus ULSA-, IFF- und Omni - Antenne bestehenden System beträgt ca. 1000 kg. Bei den Antennendrehzahlen von 10 und 20 U/min. sowie der Sektor - Abtastung verursacht die exzentrische Gewichtsverteilung hohe Beschleunigungskräfte für die Lagerung. Die Firma ABA wählte eine einfache Wälzlagerung, bestehend aus einem Kegelrollenlager welches in der Lage ist sowohl die horizontalen und die vertikalen Kräfte aufzunehmen.

Für die Montage der Drehlagerung, der Zwischengetriebe und der beiden Drehstrom Antriebsmotoren sah ABA ein Antennen - Sockel in Form einer aus Leichtmetall aufgebauten Schweisskonstruktion vor. Für den Antrieb der mit unterschiedlichen Drehzahlen betriebenen Antenne wurde ein Frequenz – Umrichterantrieb mit robusten Drehstrommotoren gewählt. Mit der Herstellung des Elektronikteils des frequenzgesteuerten Antriebes wurde an die **japanischen Firma Toshiba beauftragt**.

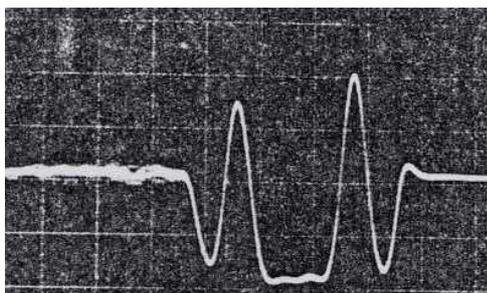
Im Frühling 1983 hatte ABA das Antriebs- und Drehlagerungssystem fertig gestellt und die zwischen dem 10. – 15. März 1983 erfolgte Werkabnahme bei ABA in Clearwater-Beach (FL) bestätigte dessen einwandfreie Funktion.

Beginn der Prototyp Testphase

Nachdem Westinghouse bereits früher Labortests an gewissen Teilsystemen ausgeführt hatte, begann ab März 1983 der Ein- und Zusammenbau des Prototypsystems in den Radar Shelter. Im Mai 1983 erfolgte die Verschiebung des Prototyps auf den firmeneigenen Teststandort Jackson - Hill. Aus Gründen der besseren Zugänglichkeit befand sich die umfangreiche im Austesten befindliche Signalprozessor Ausrüstung zu diesem Zeitpunkt noch im Labor. Da ein Operations - Shelter für das Prototypsystem nicht vorgesehen war, wurden die Anzeigegeräte in einer Baracke untergebracht.

Während der Monate Juni und Juli wurde das Radarsystem schrittweise in Betrieb genommen und erstmals über die Antenne abgestrahlt.

Bei den ersten Versuchen nach der erfolgten Installation des TAFLIR - Sendeempfang Systems im Radar Shelter zeigten sich zahlreiche Schwachstellen. Im Laufe des Sommers 1983 wurde versucht, unter Beizug von Experten aus anderen Programmen und zum Teil durch den Beizug von Spezialisten die sich bereits im Ruhestand befanden, die Ursache dieser Schwachstellen zu analysieren und zu beheben.



Als wichtiges und bezüglich Phasenstabilität hervorragendes Radarziel diente ein in ca. 15 km entfernter stählerner Wasserreservoir (Watertower). In der nebenstehenden Figur ist das bei stillstehender Antenne empfangene Echosignal nach der erfolgten Phasendetektion ersichtlich.

Mit Hilfe dieses Referenzsignals wurden die Einflüsse der einzelnen Systemkomponenten auf die Gesamtstabilität überprüft und optimiert.

Bereits zu diesem Zeitpunkt stand fest, dass die verlangte **Subclutter Visibility (SCV)** in der Radarbetriebsart Pulse Agile Mode (PAM) nicht erreicht werden konnte. Die Computer Simulationen hatten ergeben, dass mit der vorgesehenen Auslegung des **Coded Pulse Anti-Clutter Systemes (CPACS)** die in den Spezifikationen propagierte Detektions - Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt werden konnte.

In einem Crash - Programm wurde im Sommer 1983 der digitale CPACS - Decoder, umkonstruiert um ihn leistungsfähiger zu machen.

Die Signalprozessoren welche eine sehr umfangreiche Firmware und Software beinhalten wurden vorgängig im Labor schrittweise optimiert und ausgetestet. Ende Oktober 1983 erfolgte nach mehrfachen Verzögerungen deren Verschiebung auf den Teststandort und die Integration mit dem Sendeempfangs - System.

Ab November 1983 begannen die Vorbereitungen für den sog. Category I Test der den Nachweis für die Funktion der einzelnen Teilsysteme erbringen sollte.

Gemäss Vertrag stellte die Erfüllung des Category I Tests, die Voraussetzung für den Westinghouse internen Category II Test dar.

Erst wenn beide Tests erfolgreich bestanden waren, konnte in einem weiteren Schritt der TAFLIR Prototyp in die Schweiz verschoben werden um dort den Category II Test im Rahmen einer Felderprobung zu absolvieren. Ein erfolgreiches Resultat der Felderprobung war wiederum Voraussetzung für das Bestehen der sog. Truppentauglichkeit und letztlich für den Entscheid ob das System überhaupt zur Beschaffung vorgeschlagen würde.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Zeitplan von Westinghouse, welcher den Beginn der Felderprobung in der Schweiz bereits für Ende 1983 vorsah, zeichnete es sich im Spätherbst 1983 bereits deutlich ab, dass das TAFLIR Beschaffungsprogramm nicht im vorgesehenen Zeitrahmen realisiert werden konnte.

Diese Erkenntnis wurde in der Schweiz von der Gruppe Rüstung und der Luftwaffe mit unterschiedlicher Reaktion zur Kenntnis genommen.

Die Luftwaffe sah sich in ihrer gegenüber dem Westinghouse Projektvorschlag gehegten Skepsis bestätigt und befürchtete eine Rückstufung in ein späteres Rüstungsprogramm der für das Jahr 1985 geplanten Beschaffung.

Die Gruppe Rüstung beurteilte die Verzögerungen im Projektablauf optimistischer und hoffte trotzdem auf eine Einhaltung des ursprünglich geplanten Beschaffungsablaufes.

Reaktionen in der Schweiz nach den Problemen beim Category I Test

Nachdem bereits Meldungen in den Schweizer Medien über die Schwierigkeiten bei der Beschaffung des TAFLIR Systems erschienen waren, beauftragte die Geschäftsleitung der Gruppe für Rüstung - Dienste den Schweizer Radarexperten Bruno Heiz mit einer unabhängigen Beurteilung der Situation.

Bruno Heiz hatte in den sechziger Jahren als technischer Projektleiter der GRD erfolgreich die Beschaffung des Florida - Luftverteidigungssystems geleitet und galt auch bei den Mitgliedern der parlamentarischen Militärkommissionen als ausgewiesener Fachmann.

Anlässlich eines mehrwöchigen Aufenthaltes bei der Firma Westinghouse im Spätherbst 1983 versuchte sich Bruno Heiz einen Ueberblick über die technische und terminliche Situation des Projektes zu verschaffen. In einem Mitte Dezember 1983 an die Geschäftsleitung der GRD gerichteten Bericht kam zum Ausdruck, dass sich zwar der geplante zeitliche Ablauf des Projektes inzwischen um ca. 6 - 9 Monate verzögert habe, jedoch keine gravierenden technische Probleme vorlägen welche den erfolgreichen Verlauf des Projektes in Frage stellen würde. Die in der Schweiz für das Projekt verantwortlichen Instanzen beschlossen daraufhin die terminliche Planung an die inzwischen bekannten Gegebenheiten anzupassen.

Im Frühjahr 1984 waren die Testarbeiten an den Teilsystemen soweit fortgeschritten, dass mit den Category I Systemtests begonnen werden konnte. Bei den Systemtests wurden häufig von den Radarechos ziviler Linienflüge Gebrauch gemacht.

Am 17. Mai 1984 organisierte Westinghouse einen eigenen Radartestflug mit einem Cessna 210 Kleinflugzeug, das von einem Westinghouse Mitarbeiter pilotiert wurde. Das Flugzeug hatte dabei Weg- und Anflüge auf einer in östlich Richtung verlaufenden Achse bis zu Entfernungen von 110 km auszuführen.

Die Messflüge die auf der relativ geringen Flughöhen von 1600 und 3700 m/M erfolgten, erlaubten erstmals eine genauere Beurteilung des Detektionsverhaltens über Bodenclutter, sowie der Höhenvermessung.

Aufgrund der Radarüberdeckung bzw. der Geländetopographie wurden die Dopplerfilter 0 im gesamten Bereich des Testfluges durch die Clutter Map inaktiv gesteuert, so dass die Zieldetektion in den für bewegte Ziele bestimmten Dopplerfiltern erfolgen musste.

Die Auswertung der aufgezeichneten Radardaten ergab eine relativ gute Detektionswahrscheinlichkeit des Radars, jedoch eine noch ungenügende Genauigkeit der Höhenvermessung.

Die Systemtests verliefen infolge der häufig notwendigen Anpassungen und Verbesserungen sehr schleppend und erstreckten sich bis in die Sommermonate des Jahres 1984 !

Trotz noch zahlreicher ungelöster Probleme, entschloss sich Westinghouse, im Einvernehmen mit den verantwortlichen Stellen in der Schweiz im August 1984 den TAFLIR Prototyp für die geplante Felderprobung in die Schweiz zu verlegen.

Verlegung des TAFLIR Prototyp für die Felderprobung in die Schweiz

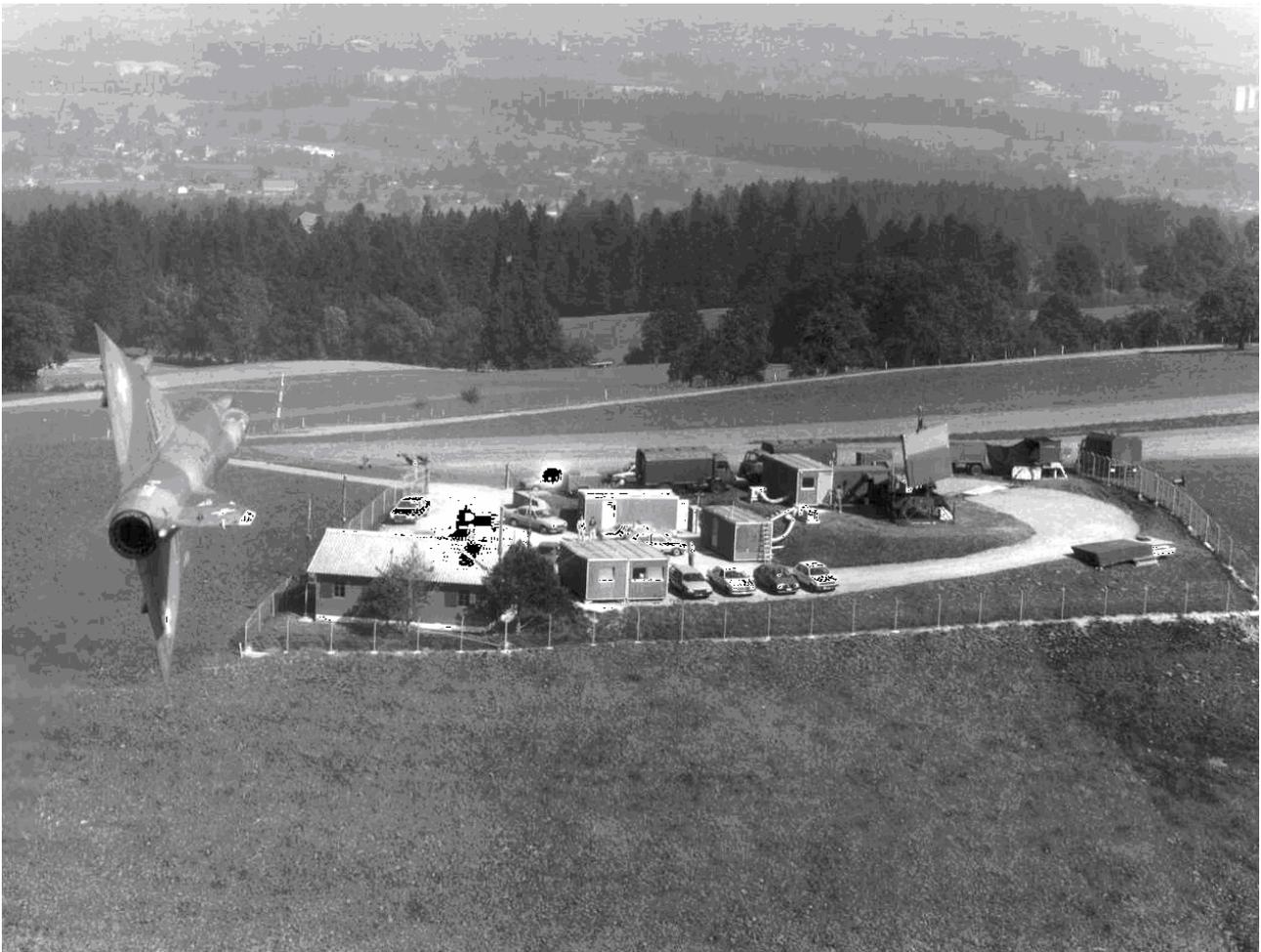
Am 3. September 1984 traf das TAFLIR Prototyp System per Luftfracht auf dem Flughafen Zürich ein und wurde am nächsten Tag auf den im luzernischen Hinterland auf 840 m/M gelegenen Teststandort Homberg transportiert. Im Anschluss daran installierte ein Westinghouse - Firmenteam das System für die ab Oktober 1984 im Rahmen des Category II Testes vorgesehene Felderprobung.

Der Standort Homberg der bereits bei der Evaluation der verschiedenen Tiefflieger-Radarsysteme benützt wurde, verfügte über eine ausgezeichnete Radarüberdeckung für Gebiete im Westen der Schweiz, wie zum Beispiel den Hanglagen vor und über dem Berner- und Neuenburger - Jura.

Die Infrastruktur des ehemaligen Flabstandortes war nach dem zweiten Weltkrieg mit der für die technische Erprobung von militärischen Systemen geeigneten baulichen Infrastruktur erweitert worden.

Das Westinghouse Firmenteam begann unmittelbar nach der erfolgten Installation mit der Inbetriebsetzung des TAFLIR - Prototyps.

Die nachstehende Foto zeigt ein Luftbild der TAFLIR - Prototyp Installation auf dem Teststandort Homberg vom September 1984. Die Aufnahme erfolgte aus dem hinteren Flugzeug beim Vorbeiflug einer Mirage III-RS Photoaufklärer Patrouille der schweizerischen Luftwaffe.



Nach der erfolgreichen Inbetriebsetzung und den standortspezifischen Einjustierung konnte erstmals die Wirkung der Dopplerfilterung in der typischen schweizerischen Radarumgebung beurteilt werden.

Wie bereits auf Grund der Resultate der in den USA durchgeführten Stabilitätsmessungen zu erwarten war, bestätigte es sich, dass die Radarbetriebsart **Burst Agile Mode (BAM)** für die Standzeichenunterdrückung knapp genügte, die Betriebsart **Pulse Agile Mode (PAM)** vermochte den zum Teil sehr starken Bodenclutter nicht vollständig zu unterdrücken.

Bereits am 19. September wurde ein erster Radartestflug mit einem Tiger F5 Flugzeug durchgeführt. Das vom Militärflugplatz Emmen gestartete Flugzeug hatte dabei auf einem westlichen Kurs auf verschiedenen Flughöhen **bis La Brevine** weg- und anschliessend wieder anzufiegen.

Auch dieser erste Testflug zeigte eine Ueberlegenheit der Radarbetriebsart BAM gegenüber dem Pulse Agile Mode !

In beiden Betriebsarten wurde mit einer Antennendrehzahl von 10 U/min. gearbeitet. Der sog. Fast Burst Agile Mode mit der Antennendrehzahl von 20 U/min. ergab eine gegenüber dem PAM noch weiter reduzierte Detektionswahrscheinlichkeit.

Erprobungs - Team auf dem Teststandort Homberg bestehend aus dem Westinghouse - Personal und den Vertretern der GRD und dem BAMF, anlässlich eines Besuches der Geschäftsleitung von Westinghouse im November 1984.

Zweiter und dritter von links sind der kommerzielle und der technischen Projektleiter Mr. Dennis Comy und Mr. Victor Grams, vierter von links ist Mr. Milt Borkowsky von der Westinghouse Geschäftsleitung der sich massgeblich für das Zustandekommen des TAFLIR - Projektes eingesetzt hatte, fünfter von links ist Mr. Freeman Fruge Leiter des Westinghouse Firmenteam bei der Erprobung in der Schweiz.



Quellenverzeichnis

- 1) Div. Korrespondenzen mit Stellungnahmen der an der Evaluation beteiligten Firmen.
- 2) G.W. Stimson, Introduction To Airborne Radar, ISBN 1-891121-01-4
- 3) A Report on the Development of an Ultra-Low Sidelobe Antenna, Westinghouse Company, Baltimore MD, November 1981
- 4) AN/TPS-43 Ultra – Low Sidelobe Antenna Development Program, Westinghouse Company, Baltimore MD, January 1982
- 5) Pulse Doppler Radar Development Program, Westinghouse Company, Baltimore MD, August 1955
- 6) Proposal for Project TAFLIR, Westinghouse Overseas Service Corporation, August 1980

- 7) Future trends in the development of low altitude aircraft detection radars, Westinghouse Company, Baltimore, June 1980
- 8) Proposal for Project TAFLIR, Hughes Aircraft Ground Systems Group, Fullerton CA, April 1980
- 9) Minutes of Berne Meeting from 29 March 1982, Westinghouse Company, Baltimore MD
- 10) MIT, Lincoln Laboratory, Radar Development, A Fifty Year Review, February 2000