



Dr. Volker Grassmann, DF 5 AI

Incoherent-Scatter: Grundlagen und Anwendungen

Die klassische Elektrodynamik lehrt, daß ein freier Ladungsträger in einem elektromagnetischen Wellenfeld beschleunigt und zur Strahlung angeregt wird, wobei die Emission (im nicht-relativistischen Fall) frequenzgleich, aber in andere Raumrichtungen bezüglich der einfallenden Welle erfolgt. Dieser Vorgang kann auch als Streuung der einfallenden Welle gedeutet werden (Thomson-Streuung), wobei dem Ladungsträger als Streukörper ein Rückstreuquerschnitt zuzuordnen ist. Der "Thomsonsche Streuquerschnitt" für Elektronen ist von der Größenordnung 10^{-24} cm^2 .

1958 wurde von Gordon angeregt, mittels Radar Streuexperimente an den in der Ionosphäre vorhandenen Elektronen zu versuchen, (2), die technische Durchführbarkeit wurde im gleichen Jahr von Bowles nachgewiesen, (1).

In diesem Aufsatz werden die physikalischen Grundlagen der inkohärenten Rückstreuung am Beispiel der europäischen EISCAT-Anlage erläutert. Im Gegensatz zur ionosphärischen Echolotung ermöglichen die VHF- und UHF-Incoherent-Scatter-Radars Messungen in allen Höhenbereichen der Ionosphäre und liefern zahlreiche Parameter zur Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Veränderungen in der Ionosphäre.

1. DIE EISCAT-ANLAGEN IN NORD-SKANDINAVIEN

Weltweit existieren sieben Incoherent-Scatter-Anlagen. Zwei besonders leistungsfähige Radarsysteme werden nördlich des Polarkreises von der European Incoherent Scatter Association (EISCAT) betrieben. Die Organisation ist ein wissenschaftlicher Zusammenschluß der Länder Finnland, Norwegen, Schweden, Großbritannien, Frankreich und Deutschland.

Das EISCAT-UHF-System besteht aus einer Sende/Empfangsanlage im norwegischen Tromsø und zwei Empfangsstationen jeweils in Kiruna (Schweden) und Sodankylä (Finnland). Die Senderspitzenleistung beträgt 1,7 Megawatt auf 931 MHz, an allen drei Standorten steht jeweils ein 32-m-Parabolspiegel zur Verfügung, **Bild 1**. Die Anlage in Kiruna ist den Funkamateuren nicht unbekannt, denn der dortige Parabolspiegel wurde bereits für EME-Zwecke eingesetzt, (6).

Die 224-MHz-VHF-Anlage befindet sich ebenfalls in Tromsø. Der Sender wird zur Zeit mit 1,5 Megawatt Spitzenleistung eingesetzt, die

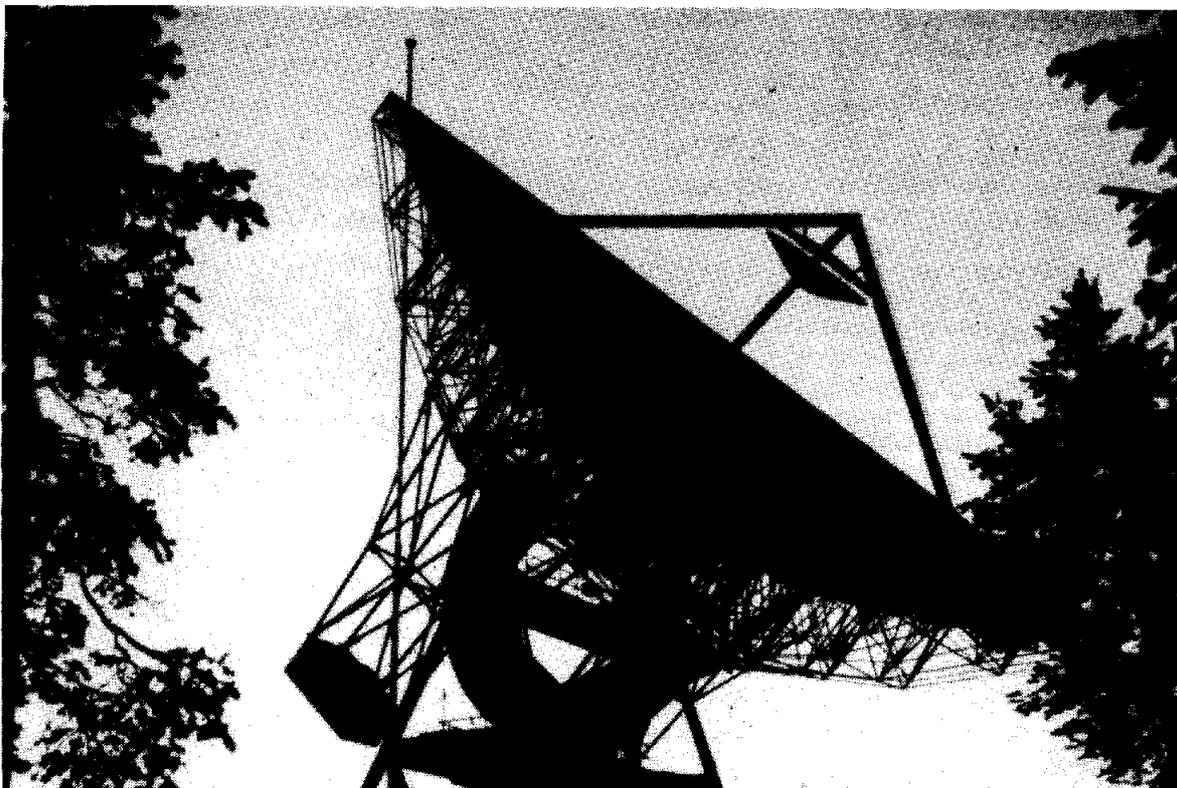


Bild 1: Der 32-m-Parabolspiegel mit Cassegrain-Erreger bei der EISCAT Empfangsstation in Sodankylä, Finnland. Baugleiche Systeme befinden sich in Tromsø, Norwegen, und Kiruna, Schweden. Auf den Meßfrequenzen bei 931 MHz steht ein Antennengewinn von 48 dB zur Verfügung, die Halbwertsbreite der Hauptkeule beträgt 0.6°. Foto: DF5AI

endgültige Sendeleistung wird 4 Megawatt betragen. Als Sende- und Empfangsantenne steht eine parabolische Zylinderantenne von 120 m x 40 m zur Verfügung. Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Systemparameter für beide Anlagen.

Das Interesse an hoch im Norden gelegenen Beobachtungsstationen steht im Zusammenhang mit der Besonderheit der polaren Ionosphäre. Die erdmagnetischen Feldlinien durchsetzen die Ionosphäre in nördlichen Breiten viel steiler als z.B. in mittleren Breiten. Daher besitzen diese Feldlinien eine größere Eindringtiefe in die Magnetosphäre, was zu zahlreichen Phänomenen führt, die in mittleren oder äquatorialen Breiten kaum oder gar nicht anzutreffen sind:

Es sei erwähnt, daß in Tromsø ferner die Heating-Anlage des Max-Planck-Instituts für Aeronomie betrieben wird. Zwölf starke Kurzwellensender (jeweils 120 kW Dauerleistung) dienen zur aktiven Modifikation des ionosphärischen Plasmas. Einige der dabei hervorgerufenen Effekte können auch mit den EISCAT-Anlagen beobachtet werden. Eine weitere Incoherent-Scatter-Anlage wird zur Zeit für Spitzbergen geplant ("Polar Cap Radar").

2. BESCHREIBUNG DER STREU-ECHOS

Im Streuvolumen der Radar-Antenne überlagern



EISCAT-Parameter	UHF-Radar	VHF-Radar	Tabelle: Betriebsparameter der EISCAT-Radars, aus (4, 5)
Standorte: (TR)	69° 35' N, 19° 13' E	69° 35' N, 19° 13' R	
(KI)	67° 51' N, 20° 26' E		
(SO)	67° 22' N, 26° 38' E		
Mittelfrequenz:	931.5 MHz	224.0 MHz	
Bandbreite:	8 MHz	3 MHz	
Pulsleistung:	1.7 MW	1.5 MW (4 MW geplant)	
Mittlere Leistung:	280 kW	140 kW (625 kW gepl.)	
Pulsdauer:	1 μ s - 10 ms	1 μ s - 1 ms	
Minimales Pulsintervall:	1 ms	1 ms	
Antennen:	Parabolspiegel 32 m Durchm.	Parab. Zylinder 40 m x 120 m	
Erreger:	Cassegrain	128 Kreuzdipole	
Gewinn:	48.1 dB	43.1 dB	
Polarisation: (TR)	Zirkular	Zirkular, linear	
(KI, SO)	beliebig		
System-Temperatur: (TR)	90 - 110 K	250 - 350 K	
(KI, SO)	30 - 35 K		

TR = Tromsø, KI = Kiruna, SO = Sodankylä

sich die Beiträge der an den einzelnen Elektronen gestreuten Teilwellen, ohne daß eine ausgezeichnete Phasenbeziehung besteht. Die inkohärente Überlagerung gab der Streumethode ihren Namen.

Das beim Empfänger registrierte Streu-Echo ist äußerst schwach, denn selbst die große Anzahl der in der Antennenkeule „beleuchteten“ Elektronen führt in der Summe nur zu einem kleinen Gesamtquerschnitt. Man vergegenwärtige sich, daß die Ionosphäre bei Frequenzen von mehreren hundert MHz im allgemeinen als durchlässig betrachtet werden darf. Den Unterschied zu einer hundertprozentigen Durchlässigkeit gilt es bei dieser Meßmethode auszuwerten.

Das von einem Ionosphärenradar (bei 1° x 1° kreisförmiger Antennenöffnung, 50 μ s Sendepuls) in der F-Region (300 km Höhe, Elektronendichte 10^{12} m^{-3}) ausgeleuchtete Streuvolumen

führt zu einem totalen Streuquerschnitt von ca. 0,2 cm². Bei einem einzelnen Radarpuls kann diese mehrere hundert Kilometer entfernte Fläche zu keinem Meßsignal führen, so daß eine Daten-Integration unverzichtbar ist. Für die positiv geladenen Ionen ist der Streuquerschnitt um den Faktor $(m_i/m_e)^2$ kleiner (m sei die jeweilige Teilchenmasse), daher darf die ionische Echo-Komponente vollständig vernachlässigt werden.

Man kann sich in Gedanken eine fiktive Elektronenverteilung vorstellen, bei der sich die Teilwellen jeweils zu Null überlagern. Auf gleiche Weise kann man sich eine strukturierte Verteilung denken, die konstruktive Interferenz begünstigt. Anhand dieser Gedanken sei angedeutet, daß nicht nur der mikroskopische Streuprozess bedeutsam ist, sondern daß die makroskopische Organisation des streuenden Mediums ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. In Wirklichkeit ist die Elektronenverteilung irregulär



```

SODANKYLA 22.01.1985 22:20:50 UT (EXP)SP-GE-CAES-A-R
AZ.EL=319 10. 8.70 RH= 690 HT= 140 PHA.AMP= 88. 0 PPD= 2243 -974
(COR-PR)GP1:DATA STAT=012003 CONTR=010160 STC= 635 635
INIT: 0 POWER, 9 ACFS, 32 LAGS, 0 INFRONT, SIGNAL IN 2. ACF
PERIOD= 10 MEAN OF ACF'S 4, 7 SUBTRACTED
REAL PART SPECTRUM FROM 2. ACF

```

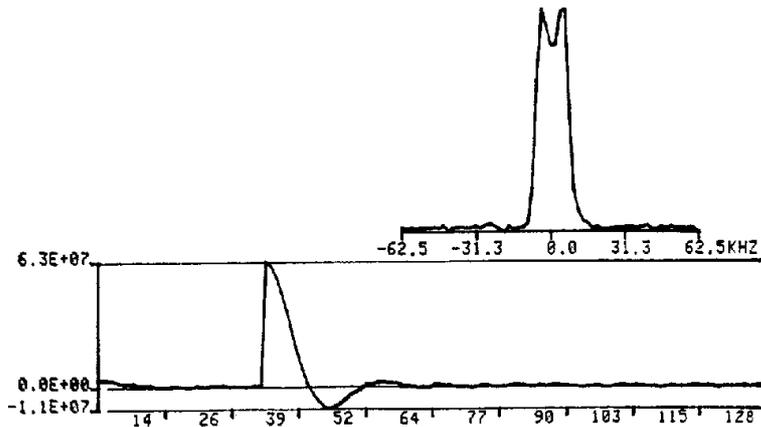


Bild 2:
EISCAT-Registrierung vom 22.1.85, Sodankylä, (3). Das Rückstreu-Echo stammt aus 140 km Höhe bei einer Entfernung von 690 km. Der untere Teil zeigt den Realteil der über 10 s gemittelten Autokorrelationsfunktion nach einer ersten Rauschbefreiung (zwischen den "Lags" 34 bis 64). Das Spektrum ging aus einer Fouriertransformation der komplexen Autokorrelationsfunktion hervor.

und fluktuierend. Mathematisch kann man diesen Zustand durch eine Überlagerung vieler kurz- und langwelliger Vorgänge simulieren.

Ein Radar ist nur in der Lage, Irregularitäten wahrzunehmen, deren Wellenlänge der halben Radarwellenlänge entspricht. Eine 2-m-Amateurstation ist beispielsweise bei einer Aurora-Rückstreuung auf Irregularitäten von ca. 1 m Länge angewiesen., für 70-cm-Auroraverbindungen sind entsprechend kleinere Strukturen verantwortlich. Diese Beziehung gilt unabhängig von dem primären Streuprozess (die von den Funkamateuren ausgenutzten Aurora-Rückstreuungen stehen natürlich nicht mit der hier behandelten Streumethode in Verbindung).

Die Irregularitäten in der Elektronendichte werden zu einem entscheidenden Anteil von den positiven und massereicheren (daher auch trägeren) Ionen kontrolliert. Auf diese Weise bildet sich in der Elektronendichteverteilung eine Signatur der Ionen ab. Obwohl die inkohärente Rückstreuung ausschließlich durch die Elektronen getragen wird, gewinnt man aus diesem Grunde wertvolle Daten über die Ionen in der Ionosphäre. Auf ähnliche Weise erhält man in beschränktem Umfang auch Informationen über die Neutralteilchen (in den betrachteten

Höhen sind ja nur etwa ein Tausendstel der Atmosphärenbestandteile ionisiert, die Neutralgas-Komponente ist auch in der Ionosphäre der zahlenmäßig dominierende Anteil).

3. RÜCKSTREUSPEKTREN

Bild 2 zeigt einen Ausdruck vom Datenmonitor, der in einem realen Experiment die momentanen Meßergebnisse anzeigt. Die Messung wurde mit dem EISCAT UHF-System vorgenommen, (3). Es zeigt die in Finnland empfangenen Streuechos des norwegischen Senders. Das kleine Teilbild zeigt die typische doppelhöckerige Gestalt der Streuspektren.

Im realen Streu-Experiment interessiert man sich für die gesamte rückgestreute Leistung (anhand derer ermittelt sich die Elektronendichte im Streuvolumen), vor allem aber für die Frequenzverteilung der Streuspektren (jedes der in Bewegung befindlichen Elektronen ruft eine Dopplerverschiebung hervor, die in der Summe



zu einem kontinuierlichen Gesamtspektrum führen). Aus der Gestalt der Streuspektren können u.a. die Elektronen- und Ionentemperaturen abgeleitet werden (in der polaren Ionosphäre bis mehrere 1000 K), aber auch Leitfähigkeiten, Stoßzahlen und die Ionensorten können ermittelt werden.

Aus der Dopplerverschiebung des Gesamtspektrums bestimmt man die Driftgeschwindigkeit des ionosphärischen Plasmas (bis mehrere 1000 m/s in der polaren Ionosphäre). Das tristatische UHF-System liefert dabei drei voneinander unabhängige Dopplermessungen, aus denen die drei Koordinaten des Geschwindigkeitsvektors berechnet werden können. Aus der zum Magnetfeld senkrechten Geschwindigkeitskomponente ($\underline{E} \times \underline{B}$ - Drift) läßt sich mit Kenntnis des lokalen erdmagnetischen Feldvektors die Stärke und Richtung des elektrostatischen Feldes in der Ionosphäre ermitteln (typischer Wert in der polaren Ionosphäre: 100 mV/m).

4. ANWENDUNGEN

Incoherent-Scatter Radars ermöglichen die Untersuchung von kurz- und langfristigen, klein- und großräumigen Veränderungen in der Ionosphäre.

Die Einzelmessungen erreichen zeitliche Auflösungen im Zehntelsekunden- bis Minutenbereich, unter Zuhilfenahme des in den vergangenen Jahren gesammelten Datenbestandes können aber auch jährliche Schwankungen oder Variationen, die mit dem Sonnenfleckenzyklus in Verbindung stehen, sichtbar gemacht werden.

Die räumliche Auflösung kann in der Vertikalen wenige hundert Meter betragen oder kann unter Ausnutzung der Erdrotation und des damit wechselnden Sonnenstandes die großräumige Horizontalstruktur der Ionosphäre anzeigen.

Die in den polaren Breiten installierten Incoherent-Scatter Radars vermögen auch Hin-

weise auf magnetosphärische Vorgänge zu geben, die viele tausend Kilometer oberhalb der Ionosphäre stattfinden. Die erdmagnetischen Feldlinien stellen Äquipotentiallinien dar, die sich von der Magnetosphäre kommend in Erdrichtung verdichten. In der Magnetosphäre hervorgerufene elektrische Potentialunterschiede werden auf diese Weise unter Verstärkung in der polaren Ionosphäre abgebildet. Da die magnetosphärischen Vorgänge im Zusammenhang stehen mit dem von der Sonne abströmenden Teilchenstrom, können ionosphärische Vorgänge auch in Abhängigkeit vom Sonnenwind oder von der Sektorstruktur des interplanetaren Magnetfeldes studiert werden. Bei den letztgenannten Untersuchungen werden die Incoherent-Scatter Daten z.B. mit den Beobachtungsergebnissen satellitengestützter Experimente kombiniert.

5. LITERATURHINWEISE

- (1) Bowles, K.L.: Observation of vertical-incidence scatter from the ionosphere at 41 Mc/sec
Phys. Rev. Lett., Vol. 1, No. 12, 1958, 454 - 455
- (2) Gordon, W.E.:
Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar
Proc. I.R.E., Vol. 46, 1958, 1824 - 1829
- (3) Grassmann, V.:
Inkohärente Rückstreuung von Radiowellen durch ein Plasma unter Berücksichtigung von Teilchenstößen
Max-Planck-Bericht MPAE-W-100-88-07, 1988
- (4) Röttger, J. et al.:
EISCAT annual report 1988
Kiruna, Schweden, ISSN 0349-2710
- (5) EISCAT (Informationsbroschüre)
- (6) The SK2GJ Story
Dubus, 1/81, 51 - 53