

3.4 地上送信端末から電波望遠鏡の受ける 電波干渉 RFI 評価

中島 潤一^{*1} 小山 泰弘^{*2} 関戸 衛^{*1} 栗原 則幸^{*3}
近藤 哲朗^{*1} 柴田 克典^{*4}

3.4 Radio Telescope Interference from a Ground Transmitter

By

Junichi NAKAJIMA, Yasuhiro KOYAMA, Mamoru SEKIDO,
Noriyuki KURIHARA, Tetsuo KONDO, and Katsunori SHIBATA

We report measurements of RFI (Radio Frequency Interference) from a mobile ground transmitter to a radio telescope system. Radio telescopes are equipped with a very sensitive LNA (low noise amplifier) in their focus. Although they are designed to have maximum sensitivity to extra-terrestrial radio sources with large aperture toward a pointing direction, the gain in undesired directions are still so high that they are apt to receive nearby terrestrial-based emissions. In this experiment the Global Star System mobile terminal with a frequency 1612.8 MHz was used as a transmitter and the Kashima 34-m radio telescope received the signal from 172 remote points. The received strength are evaluated based on the definition of the ITU recommendation RA.769-1. The signals are very strong and often harmful to radio-astronomical observation. But the strength of the RFI is absorbed by the transmitting distance and its transmitted area.

[キーワード] 電波望遠鏡, 無線周波干渉 (RFI), 低地球周回軌道衛星 (LEO)

Radio telescope, Radio Frequency Interference (RFI), Low Earth Orbit Satellite (LEO)

1. はじめに

1.1 増大する RFI と規制

電波宇宙望遠鏡の受ける無線周波環境 (RFI: Radio Frequency Interference) は近年深刻な問題となっている (Thompson et al., 1991)⁽¹⁾。人口密度の高い我が国、鹿島 34m の電波望遠鏡で観測されている RFI は、Kawaguchi⁽²⁾, 1998 により報告されている。今後は移動通信サービスからの RFI がますます増加すると懸念

されるにもかかわらず、望遠鏡周辺の送信機をつかっている RFI 放出の積極的な測定は報告されていない。これは、天文学者自身により、保護されている周波数帯域内で、送信機のライセンスを取得することの困難さなどによるものである。過去において深刻な干渉のほとんどは、限られた数の無線業務間 (例えば: 軍施設、マイクロ波衛星リンク・ステーション、レーダーと電波望遠鏡) の間でしか発生していなかった。このような干渉を測定するためにドミニオン電波天体物理観測所 (Dominion Radio Astrophysical Observatory) で 408MHz でのモニタリング・システムが開発されている (Romalo et al. 1989)⁽³⁾。現在、これらのマイクロ波以上の帯域は周波数利用の進歩とともに一般ユーザーの利用に開放され通信用としての需要が急増している。このため、近

*1 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

*2 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室
(2001年1月より内閣府技官に併任)

*3 標準計測部 周波数標準課

*4 国立天文台

い将来にこれまでと違った状況、非常に多くの送信機が電波望遠鏡の周辺に現れるという事態が想定される。LEO（低地球周回軌道衛星：Low Earth Orbit satellite）端末は1612MHzを利用するこの種の送信機の一例である。周波数資源が限られているため、LEOのグローバル・スター（Global Star）システムの地上端末は、1613.8-1612MHzの電波天文帯域（radio astronomy band）とオーバーラップして周波数配分されている。1612-1613.8MHzの間の帯域は、Hydro-Oxylラインの観測のため電波天文に割り当てられている。このような事例において干渉回避のためITU（International Telecommunication Union：国際電気通信連合）は勧告（ITU-R）（RA. 769-1, RA. 1031-1およびM. 1316）^(4,5)を公布している。これらには電波天文サービスでの電波最大許容フラックス（maximum acceptable flux）と、電波システムの共存に対する手法が含まれている。今回、総務省（旧郵政省）、グローバル・スター社（Global Star Japan K.K）およびCRL（通信総合研究所：Communications Research Laboratory）は電波天文帯域（radio astronomy band）で積極的に送信機を使って、積極的にRFI測定を行った。

1.2 電波望遠鏡およびRFI

電波望遠鏡に近傍からのRFIが混入した場合、そのIF（変換中間周波数）帯域の取得結果や検波器出力はもはや実際に指向した方向からの放射を正確に測定することは出来ない。VLBI（Very Long Baseline Interferometry：超長基線干渉実験）においてのみ、共通受信されない微弱RFIでデータを復旧する可能性があるが、これは、2基の別々の望遠鏡を使い、データ処理においてRFIを非相関成分として除外することができるからである。しかし、一般的な電波干渉計は、接近して配置されている素子から構成されており、同じRFIを同時に受信する。さらに、1基のパラボラ・アンテナの観測では、受信するRFIを軽減する機能はまったくない。VLBI望遠鏡さえも、RFIが衛星によるものであれば、同じ干渉を受信することになる。

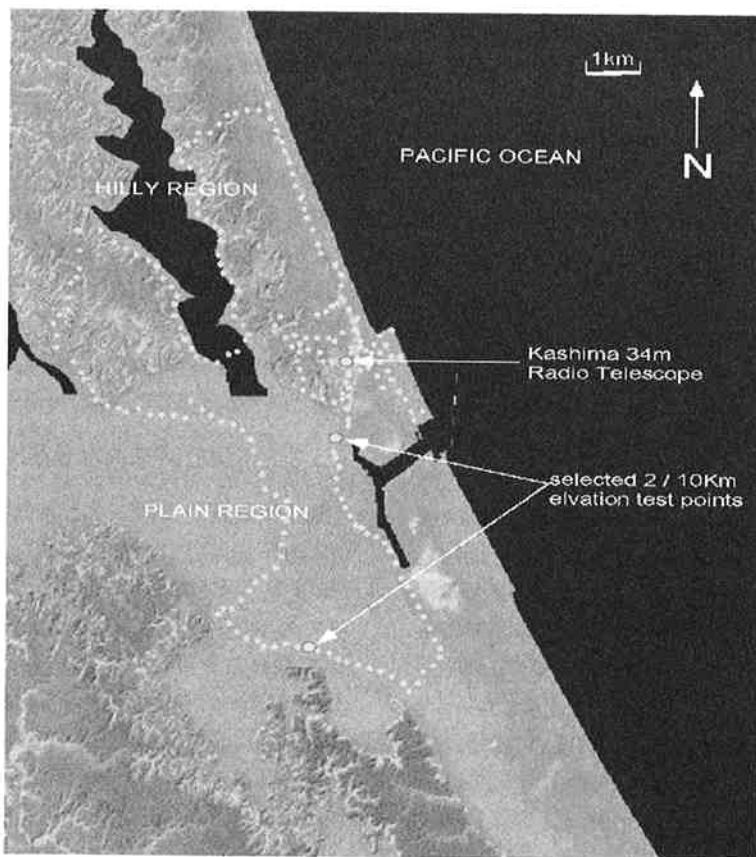
通常、観測者は、IFにおける強力なスペクトルや検波器出力における不規則な変動により干渉の存在に気がつく。地上RFI源に対して、電波望遠鏡の狭いメインビームが直接対向しカッピングすることは観測運用上あまり発生しない。よって典型的なカセグレン電波望遠鏡へのオフ・ビーム方向RFIエントリ（Off beam direction RFI entry）は以下の3つの理由から発生すると考えられている。まず、1番目の理由は、RFIソースに対する望遠鏡のマイナー・ロープ・カプリング（minor-lobe coupling）である。 -60 から -80 dBのマイナー・ロープはあらゆる方向に周期的に存在する。これらのロープは天体観測時においては無視される程度の影

響しかない。しかし、これらのマイナー・ロープが、ひとたび地上RFIとカッピングした場合、メインロープで受信する微弱なターゲットに比較して無視できない強度の人工信号を受信する可能性がある。2番目は、RFI方向へのフィード・ビーム・パターンの直接的なカッピングである。副鏡を見込むフィード・ホーンのビームパターンは λ/D 離れた方向に、 -60 から -80 dBレベルのマイナー・ロープをやはり持っている。ロープは電波望遠鏡が低仰角にある場合は、地上物体とカッピングする可能性が高い。3番目の理由は、電波望遠鏡の機械的構造と近隣の建物等で発生する電波の反射と散乱である。カセグレン形式の電波望遠鏡は主反射望遠鏡と副反射望遠鏡（サブレフ）を持っているが、サブレフを保持するには支持構造が必要である。これら構造により発生するサイド・ロープ（off-axis side-lobes）については、Hunt et al. 1992⁽⁶⁾で報告されており、日中微弱な太陽による電波放射が構造に反射して副次的影響が発生することが示されている。マイクロ波帯においては太陽電波に比べ地上からの混信は遙かに強力である。これら3種類のRFI混入比率は原理的にそれぞれの寄与を観測時に分離することが難しい、よって我々の実験ではあくまでも実験結果を中心に、測定回数を増やしデータを統計的に扱い評価をすることとした。

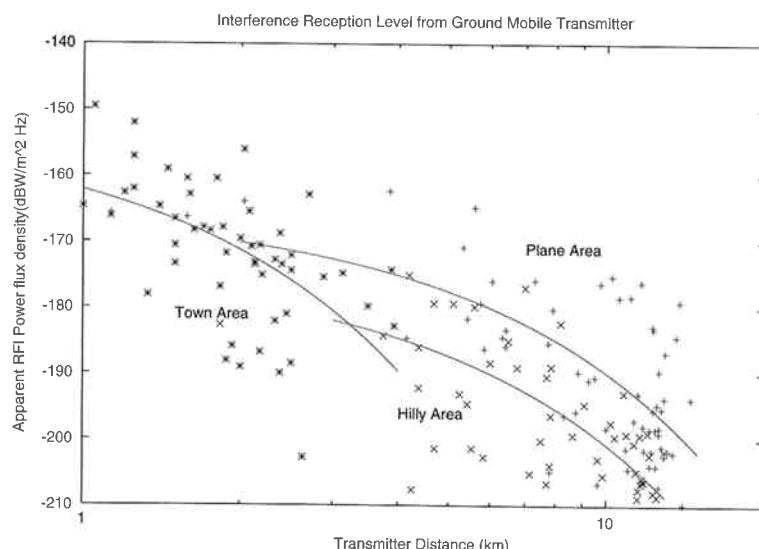
受信システムでは強力なRFIが受信されると、不要スペクトラムの受信の他に、2種類の問題が発生する。その内の1つはLNA（低雑音增幅器：Low Noise Amplifier）飽和である。天文受信システムの設計においては、その重要性が低雑音指数（NF）のパフォーマンスに置かれているが、ダイナミック・レンジはあまり考慮されていない。フロント・エンドでのLNAと一連のポスト增幅器はNFに対して最適化されている。LNAの飽和が発生すると、本来雑音を示す出力は、妨害発生源周波数の単色に近い信号になる。ポスト增幅器もオーバーロードとなる可能性がある。もう一方の問題は周波数変換でのIM（相互変調：inter-modulation）である。IMは、2つより多くの強力信号により受信器の非線形部分で発生する。これは、2つの強力RFIの間で発生するか、ローカル・オシレータとRFIの間で発生する。 f_1 と f_2 の周波数成分がある場合、IMは mf_1-nf_2 という他の周波数スペクトルを発生させる。 m と n は自然数である。このことは、電波天文帯域（radio astronomy band）保護に関係なく、近隣の強力な通信が、受信システムで、電波天文バンド内に強力なスペクトル（radio astronomy in-band spectrum）を発生させることを意味する。

2. RFIの強さの測定

RFIレベルを測定するために、グローバル・スター



第1図 鹿島 34m 望遠鏡の周辺の 240 点の RFI 測定点。この電波望遠鏡を中心としたルートは約 240km である。地図のグレースケールは高度を示している。鹿島は関東平野の東側で太平洋に面し、この地域の最大高度は海面から 70m 未満である。



第2図 電波望遠鏡からの距離に対して測定された RFI 電波密度。北の丘陵地帯、平地の工場地帯、市街地からのデータが異なる記号でプロットされている。

社 (Global Star Japan K.K) と我々のグループは、1998年6月10日の深夜に実験送信を行った。他の携帯電話基地局などは12pmから6amの間は比較的静かであるのでこの時間帯を使用した。送信機は車両に取り付け、車上のハイップアンテナより0.7W CWの送信機を擬似的に送信、移動送信機は望遠鏡の周囲を走行し、電波望遠鏡側では第1図で示されるように、0から20kmの間の距離で240点の受信強度を測定した。それぞれのポイントは道路沿いに配置され移動車両は測定の間停止する。道路状況によりこれらから173点の有効な測定データが得られた。鹿島の34m電波望遠鏡は、天頂方向を向いた状態でこれら信号を受信し、スペクトラム・アナライザで送信機の強度を測定し、すべての信号は、オフビーム方向から入ってきているものである。鹿島34m望遠鏡は北の丘陵地帯と南の市街地(平地)の間に立地しているためデータ・ポイントを3種類の送信地域(丘陵地帯、平地、2km内の近隣)によってそれぞれ区分した。第2図では距離に対するすべての測定を示している。RFIの電波密度は、スペクトラム・アナライザで観測される受信機系のノイズ・フロアから計算される。この図では付録(Appendix)を使い、観測された信号強度(レシーバー・ノイズ・フロアに相対する)が受信フラックスに変換されている。但し注意すべき点はオフビーム入射の強度変換においては、望遠鏡が受信している正確な放射量への変換が著しく困難な測定量であるため、これは、「見かけの」受信強度として扱われるべきものである。一方このデータは、電波天文業務が他の無線業務に、RFIの実存を客観的に示すことができる唯一のデータである。オフビーム入射から得られるこの「見かけの」受信強度は、実際に受信されるフラックスより低くみつめられるため、注意深い取り扱いを必要とされるが、この状態においてもそれらは、ITU-R許容値より大きな強力RFIとなっていることが注目される。今回の測定により以下の結果が明らかとなった。

- (1) 送信機が望遠鏡から2km半径以内にある場合である。望遠鏡のダウン・コンバータを含むLNA(低雑音増幅器)システムはしばしば飽和状態となる。
- (2) 送信機が望遠鏡から2km以上離れている場合でも、観測を行うには干渉が強すぎる。
- (3) 送信機が望遠鏡から離される場合、干渉は次第に減少する。そして信号の強度はその発信エリアに依存する。第2.1項で説明されているように、受信強度は、オフビーム・カプリングにより20dBから40dBの間で変化する。しかし、統計的分布は、送信機の置かれたエリアにより送信電波が減衰を受ける一般的傾向を明らかにした。草木の多い丘陵地帯では、RFIレベルは吸収され、障害物のない市街地(平地)より

10dB低くなっている。これは、実線で示されている回帰分析により示されている。

(4) 信号は、15kmポイントでの送信機からも受信可能なレベルである。データによっては、送信端末の強度は、VLBI用の注入キャリブレーション・トーンに匹敵するようになっている。このトーンは、通常、バンドスペクトルの1パーセント・パワーとしてデータ処理使われる程度のもので、この程度であれば送信電波が混入していても、VLBIの連続波観測を行うことは可能かもしれない。しかし、他のシングルディッシュなどの観測方法にとっては依然として有害である。

3. 結論と将来的な受信システムへの指針

電波望遠鏡受信機システムは、2km範囲の近傍市街地にある送信機により飽和される。IF出力は強力な干渉により支配される。このような状態では、レシーバー・システムのノイズ帯域特性すらが消滅する。係る状態が発生するのを避けるために、グローバル・スター社(Global Star Cooperation)と鹿島・野辺山・臼田などの電波望遠鏡間では、望遠鏡観測スケジュールに基づいて、地域エリア内での送信端末操作を禁止することに合意した。技術的に検討されているLNA飽和を防ぐもうひとつの方法は、帯域選択型LNAシステムである。LNA前にはわずかな挿入損失でもシステムの雑音温度を増加させるが、NRAO(National Radio Astronomical Observatory:米国立電波天文台)は、LNAの前面で冷却バンドパスフィルタを採用しRFIを防ぐ方針を探っている。さらに、新規LNAの設計は、RFI許容度を重視して選択されるべきである。増幅器1dBゲインコンプレッション(P1dB GCP)のパラメータは、飽和に至る前にそのLNAのダイナミック・レンジ・パフォーマンスを表すのでこれを指標として選択することが好ましい。受信システムのレベル設計も同じく飽和入力が途中で起きにくい設計とすべきである。今回の実験では強力なRFIが電波望遠鏡システムに入った場合、IFにおける相互変調を確認した。

第2図ではRA 769-1を使ってフラックスに変換したすべての観測データが示されているが、このデータは、共存する無線業務からのRFIの電波天文許容レベルを満足していないものである。

送信端末が飽和エリアの外に出て距離が離れた場合、RFIのレベルは減少する。遠隔地におけるRFIの出現強度は、自由空間損失 $P_r/P_t = (\lambda/4\pi D^2)$ を超えない。この場合、 P_r は受信したパワー、 P_t は送信されたパワー、 λ は波長、そして、 D は送信機と望遠鏡の間の距離である。注目すべきことは、丘陵地帯からの送信から-10dBのRFI信号減衰があったことである。このことは、周囲が複雑な地理的環境であるほど望遠鏡にとっては、

RFI の影響を受けにくい利点があることを示している。弱い RFI に関しては、デジタル的なアダプティブキャンセルシステムをつかって RFI を低減させる新しい方法が Burnbaum et al. 1998⁽⁷⁾ によって開発されている。このデジタル・システムは実用化を目指して開発中であり、基礎実験の段階ではあるが RFI を低減させる結果を得ている。

今回我々の測定したデータは、鹿島 34m 望遠鏡に関する RFI 典型的な測定結果であり、他の望遠鏡の RFI 評価の参考例となると結論付ける。電波望遠鏡の周囲の RFI は増加しているので、すべての電波観測施設は新しく導入される無線サービスについて注意深く調査する必要があり、また、レシーバーとの帯域幅内外においてその状況を監視する必要がある。

謝 辞

我々は、この測定を共同で行った President E. Short および R. Seboli に感謝をする。また我々は、実験に関するコメントや提案をいただいたことに対して、Prof. Oishi (NAO), Prof. Richard Thompson, Dr. Vivek Dwahan および Mr. Daniel Mertely に感謝する。最後に、郵政省の衛星移動通信課 (Satellite Mobile Communication Section) に感謝する。

付 錄

電波天文観測においては、ITU-R 769-1 が、他の無線サービスからの、電波望遠鏡の有害干渉レベルを定義する上で重要な役割を果たしている。以下は、その ANNEX-1 および TABLE-1 からの実用的計算をまとめたものである。

ITU-R 769 では、電波望遠鏡は、受信電力を測るラジオメータとして定義されている。Kraus などに見られる感度計算と同じであり、ラジオメータとしての最少の最小検出電力は以下の通りである。

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 \cdot t}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

この場合、 Δf_0 はレシーバーの帯域幅であり、 t は積分時間、 ΔP は 1σ から 3σ で決められる r.m.s. 検出限界である。電波望遠鏡では、受信電力はノイズ等価温度 T でしばしば表現され、その変換関係は以下の通りである。

$$\Delta P = k\Delta T, \quad P = kT \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J・K⁻¹) はボルツマン定数である。したがって、式(1)は以下のように書き表される。

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{2 \cdot \Delta f_0 \cdot t}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ΔT は最低測定可能雑音温度である。通常、システム温度 T は T_a (アンテナ温度) と T_r (受信機雑音温度) を含んでいるが、 T_a の変化は、天候、アンテナ環境や運用条件に影響される。また T_r は LNA 個々の性能によっても変化する。当該周波数においてこれらの代表値は ITU-R RA. 769-1 の TABLE-1 でまとめられているものを用いることになる。望遠鏡は特定の積分時間を観測するものであるが、ANNEX-1 では、 $t = 2000\text{sec}$ が典型的な積分時間として採用されている。 T_a , T_r , t を使って、 ΔT が典型的な望遠鏡に対して計算され、そして、これが各周波数において RFI 評価の比較ベースとなっている。

ITU-R, RA. 769-1 では、望遠鏡は 10% の干渉 RFI パワーを許容すると勧告しているので、干渉 RFI パワー ΔP_h は以下のように定義される。

$$\Delta P_h = 0.1 \cdot \Delta P \cdot \Delta f_0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

一方、スペクトルラックス密度は RFI レベルを表現するのに効果的である。ここでは、有害パワー P_h は測定可能な量であり、等方向性アンテナで受信されていると前提されている。等方向性アンテナに対する有効口径エリアは $A = c^2/4\pi f^2$ であり、したがって、スペクトルラックス $S_h \Delta f_a$ は ΔP_h を修正することにより得られる。

$$10 \log \left[\frac{f^2 \cdot 4\pi}{c^2} \right] = 20 \log f - 38.6 \text{dB} \quad \dots \dots \dots (5)$$

この式で f は MHz によって与えられることに注意する。 S_h (スペクトルラックス密度) は前提されている帯域幅 (これも TABLE-1 での典型値として定義されている.) を使って得られる。

1665MHz での RFI 評価を例として示すと、以下のパラメータは ITU-R, RA. 769-1, TABLE-1 から得られるものである。

- (1) 電波天文観測センター周波数 : $f_c = 1665\text{MHz}$
- (2) 前提帯域幅 : $\Delta f_a = 10\text{MHz}$ (その周波数で科学的に必要とされている)
- (3) 最低アンテナ温度 : $T_a = 10\text{K}$ (典型的アンテナ雑音温度)
- (4) レシーバー雑音温度 : $T_r = 20\text{K}$ (典型的レシーバー雑音温度)

方程式(1)から(5)を使い、例えば以下のように計算されることとなる。

- (5) 最小検出雑音温度 ΔT (mK)

$$\begin{aligned} \Delta T &= T / \sqrt{2 \cdot \Delta f} \\ &= (T_a + T_r) / \sqrt{2 \cdot \Delta f_0} \\ &= (10 + 20) / \sqrt{20 \cdot 10^7 \cdot 2000} \\ &= 0.15\text{mK} \end{aligned}$$

(6) 電力密度 ΔP (dB (W/Hz))

$$\begin{aligned}\Delta P &= 10 \log[k\Delta T] \\ &= 10 \log[1.38 \times 10^{-23} \cdot 0.15 \times 10^{-3}] \\ &= -267 \text{dB(W/Hz)}\end{aligned}$$

(7) 許容有害入力パワーは ΔP_h (dBW) である。

$$\begin{aligned}\Delta P_h &= 10 \log[0.1 \cdot \Delta P \cdot \Delta f] \\ &= -10 - 267 + 70 \\ &= -207 \text{dB(W/m}^2)\end{aligned}$$

(8) 有害なスペクトルフラックス $S_h \Delta f_a$

$$\begin{aligned}S_h \Delta f_a &= \Delta P_h + 20 \log f - 38.6 \\ &= -207 + 20 \log(1665) - 38.6 \\ &= -181.2 \text{dB(W/m}^2)\end{aligned}$$

(9) 有害スペクトルフラックス密度 S_h

$$\begin{aligned}S_h &= 10 \log[(S_h \Delta f_a) / \Delta f_a] \\ &= -181 - 70 \\ &= -251 \text{dB(W/m}^2 \cdot \text{Hz})\end{aligned}$$

RFI 測定の例

望遠鏡 IF に現われる特定の RFI レベルを測定するためには、受信温度を最初に測定する。ホット・ロード (hot load), コールド・ロード (cold load), 注入雑音ダイオード, あるいは, 既知の強力な電波源を用いることにより, RFI の受信された温度を計測し, 式(6)を使って, RFI を電力密度に変換可能である。3dB の干渉波が, 鹿島 34m 電波望遠鏡でノイズフロア (スカイ・レベル) から観測されている場合 ($T_a = 28\text{K}$, $T_r = 10\text{K}$ in 1610MHz), レシーバーの前のホット・ロード (294K) とコールド・ロード (53K) の物理的温度, そして, 6.0 dB, $G/T = 8.5/(294-53)$ の出力差を使い以下を得ることができる。

$$\begin{aligned}P'_h &= 10^{0.3} \times (241/8.5) \\ &= 56.9\text{K}\end{aligned}$$

この測定は、他のサービスと比較するために、ITU-R, RA. 769-1 (ANNEX 1-2) でスペクトルフラックス密度に変換することができる。

$$\begin{aligned}S'_h &= 10 \log(56.9 * 1.38 * 10E - 23) \\ &= -211 \text{dB(W/Hz)}\end{aligned}$$

計算されている RFI のフラックス密度は、ITU-R RA. 769-1 が帯域幅で -267 (dBm/Hz) と定義しているより強力である。メイン・ロープ・カプリングなしで受信された RFI の場合、望遠鏡は正確な電力フラックスを測定していないが、実存している RFI フラックス密度を過剰に評価することは無い。また、スペアナ等で発見される RFI は通常、ITU-R, RA. 769-1 を満たさない強力な現象と理解できる。近隣にある他の無線業務に対して RFI の状況を数値的に説明することが重要である。

参考文献

- (1) Thompson A. R., Gergely E. T., and Vanden Bout A. P., 1991, PHYSICS TODAY, November, p.41.
- (2) Kawaguchi K., 1998, in Preserving Astronomical Windows, ASP Conf. Ser., Vol.139 p.43.
- (3) Romalo D. N., Dewdney P. E., ITO M. R., and Landecker T. L. in it IEEE Trans. Instr. and Meas., Vol.38, No 4., 1989.
- (4) ITU-R RA. 769-1, 1992-1995, RECOMMENDATION, PROTECTION CRITERIA USED FOR RADIO ASTRONOMICAL MEASUREMENT RECOMMENDATION, ITU-R RA. 1031-1, 1994-1995, PROTECTION OF THE RADIO ASTRONOMY SERVICE IN FREQUENCY BAND SHARED WITH OTHER SERVICES.
- (5) ITU-R M. 1316, 1997, RECOMMENDATION, PRINCIPLE AND A METHODOLOGY FOR FREQUENCY SHARING IN THE 1610.6-1613.8 AND 1660-1660.5 MHz BANDS BETWEEN THE MOBILE-SATELLITE SERVICE (EARTH TO SPACE) AND THE RADIO ASTRONOMY SERVICE.
- (6) Hunt A., and Wright A., in it Mon. Not. R. Astr. Soc., 258, p.217, 1992.
- (7) Barnbaum C., and Bradley R. F., in it Astron. J., 115, p. 2598, 1998.