

# 電波天文帯への干渉閾値

青木 貴弘 (山口大学)

2018 年 4 月 23 日 更新

## 概要

この文書は電波天文帯への干渉閾値を定めた文書 ITU-R RA.769-2 についてまとめ、それをもとに電波天文帯への干渉レベルを評価する際の指針を示した、個人的備忘録である。ある電波天文局に対する干渉閾値を計算する際は、本来は、その局のシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$ 、観測帯域の中心周波数  $f$  とその帯域幅  $\Delta f$ 、および積分時間  $t$  という 4 つの情報が必要となる。RA.769 ではそのような個々の事情は考慮せずに済むよう、各電波天文帯に対する干渉閾値を例示しているが、その計算に用いている積分時間 2 000 s という値は特段の意味がない単なる例であることに注意すべきである。

## 1 RA.769 干渉閾値の定義

電波天文帯への干渉閾値は ITU-R RA.769\*<sup>1</sup> で次のように定義されている。単位帯域幅あたりの雑音電力 (power spectral density) が  $p$  だったとき、その雑音レベルは  $p = kT$  で関係づけられる温度  $T$  を用いて表されることがあり、等価雑音温度と呼ばれる。ここで  $k$  はボルツマン定数を表す。アンテナのシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  は、宇宙からアンテナにいたる伝搬システム (宇宙背景放射や地球大気など) の影響によるアンテナ雑音温度  $T_A$  と受信機雑音温度  $T_{\text{RX}}$  の和として

$$T_{\text{sys}} = T_A + T_{\text{RX}} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

と書け、これを用いて電波望遠鏡の最小検出感度は、測定される  $T$  と  $p$  のゆらぎの偏差として

$$\Delta T = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta f t}} \quad [\text{K}], \quad \Delta p = k \Delta T \quad [\text{W Hz}^{-1}] \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\Delta f$  は観測帯域幅、 $t$  は積分時間を表す。積分時間は観測によってまちまちであり、単一鏡による連続波観測の場合 1 時間程度、スペクトル線観測の場合 10 時間程度になりうる。RA.769 では、干渉閾値の計算例として積分時間  $t = 2\,000$  s の場合を仮定して掲載しているが、その値は単一鏡による連続波観測に対しては妥当である一方、その他の観測に対しては不十分なので注意を要する。

以上の量を用いて、RA.769 における干渉閾値  $\Delta P_H$  は

$$\Delta P_H = 0.1 \Delta p \Delta f \quad [\text{W}] \quad (3)$$

と定義される。つまり、帯域幅  $\Delta f$  の観測におけるシステム雑音電力  $\Delta p \Delta f$  に対し、その 10% 以内の誤差を引き起こす人工電波干渉は許容する、ということの意味する。ただしアンテナは利得をもち受信電力はアンテ

\*<sup>1</sup> ITU-R RA.769 <https://www.itu.int/rec/R-REC-RA.769/en>

ナに依存するため、空間を伝わる電波の強度に直す必要がある。それにはアンテナの有効開口面積を仮定する必要があるが、人工電波干渉を議論する際にはアンテナのサイドローブでそれを受信するという状況を考え、一般的な代表値として等方性アンテナを仮定し、有効開口面積を  $A_e = c^2 / (4\pi f^2)$  とする。ここで  $c$  は光速、 $f$  は観測帯域の中心周波数である。RA.769 は、式 (3) をこの開口面積  $A_e$  と帯域幅  $\Delta f$  で割った量を spectral power flux density (以降フラックス密度と呼ぶ) の閾値としており\*2,

$$S_H = \frac{\Delta P_H}{A_e \Delta f} = 0.1 \frac{\Delta p}{A_e} = 0.1 \frac{kT_{\text{sys}}}{A_e \sqrt{\Delta f t}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}] \quad (4)$$

と与えている。

通常のアンテナは片偏波のみを受信するため、フラックス密度  $S$  と単位帯域幅あたりの受信電力  $p$  の間には

$$p = \frac{1}{2} S A_e = kT, \quad \text{i.e.,} \quad S = \frac{2p}{A_e} = \frac{2kT}{A_e} \quad (5)$$

という関係が成り立ち、そのアンテナの最小検出感度は

$$\Delta S = \frac{2\Delta p}{A_e} = \frac{2k\Delta T}{A_e} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A_e \sqrt{\Delta f t}} \quad (6)$$

で定義される。したがって RA.769 で定義する干渉閾値  $S_H$  は、等方性アンテナを用いた片偏波観測における最小検出フラックス密度  $\Delta S$  の 5% として、

$$S_H = 0.05 \Delta S, \quad \Delta S = \frac{2kT_{\text{sys}}/A_e}{\sqrt{\Delta f t}}, \quad A_e = \frac{c^2}{4\pi f^2} \quad (7)$$

で与えられる。この式から、ある電波天文局に対する干渉閾値を計算する際は、その局のシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$ 、観測帯域の中心周波数  $f$  とその帯域幅  $\Delta f$ 、および積分時間  $t$  の情報が必要となる。

## 2 RA.769 干渉閾値の計算例

日本国内での電波天文帯は総務省周波数割当表\*3に示され、それらは齋藤氏らによってわかりやすくまとめられている\*4。たとえば電波天文帯 1400–1427 MHz での連続波観測に対する干渉閾値は次のように計算できる。アンテナ雑音温度を  $T_A = 12$  K、受信機雑音温度を  $T_R = 10$  K とすると、システム雑音温度は  $T_{\text{sys}} = 22$  K である。帯域幅は 27 MHz であり、例として積分時間を  $t = 2000$  s とすると、式 (2) の最小検出感度は温度にして  $\Delta T = 0.095$  mK、電力にして  $\Delta p = 1.31 \times 10^{-27}$  W/Hz =  $-269$  dB(W/Hz) となる。したがってこの観測に対して許容できる干渉閾値は、式 (3) から  $\Delta P_H = 3.54 \times 10^{-21}$  W =  $-205$  dBW であり、式 (7) から  $S_H = 3.64 \times 10^{-26}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup> =  $-254$  dB(W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>) となる\*5。これらの値は RA.769 Table 1 に示されているものだが、仮定されている積分時間  $t = 2000$  s に特段の意味はなく、様々な積分時間に対する計算について当該表で注意書きされている。

同様にしてスペクトル線観測に対する干渉閾値も計算しなければならない。スペクトル線は一般に狭帯域であるため、その観測も狭帯域であり、ゆえに当該帯域に対しては干渉閾値も小さくなる。

\*2 RA.769 原文では説明なく 'pfd' という略称が使用されているが、恐らく power flux density を意味しているものと思われる。

\*3 総務省周波数割当計画 <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/share/plan.htm>

\*4 齋藤正雄, 亀谷收, 立澤加一, 天文月報 2015 年 9 月号, pp.599–608, [http://www.asj.or.jp/geppou/archive\\_open/2015\\_108\\_09/108\\_599.pdf](http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2015_108_09/108_599.pdf)

\*5 物理量とその dB 単位の物理量を結ぶ等号は、数学的同値でなく物理的同値を表す。また RA.769 原文での 1413.5 MHz における干渉閾値は  $S_H = -255$  dB(W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>) と書かれている一方、ここでは  $-254$  と求められているが、計算の丸め誤差である。

### 3 閾値計算時の注意

前述の通り，ある電波天文局に対する干渉閾値を計算する際は，その局のシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$ ，観測周波数帯  $f, \Delta f$ ，積分時間  $t$  という 4 つの情報が必要となる．ただし実際の観測形態は無視して電波天文帯域に対する干渉検討のみをするならば，RA.769 Table 1 (連続波観測の場合) と Table 2 (スペクトル線観測の場合) の値から 6.3 dB を引いた値 (積分時間を 10 時間とした値) を閾値と考えれば，ひとまず問題ないと思われる．ただし，RA.769 で示されている計算は人工電波が時間変動しないことを前提とした「例」であり，例えば瞬時的に大強度の電波を放射する場合は，積分値としては干渉閾値に達さなくとも，瞬時的には天文観測に多大な影響を及ぼす．このような瞬時的な電波が天文帯に干渉することは，パルサーや星の爆発のような突発的天体現象の観測にとって致命的であり，単なる人工電波を宇宙の天体だと誤認させ，科学的信頼を貶めてしまう可能性を孕んでいる．とはいえ「いつ，どこで，どのような電波が放射されるか」という情報さえわかれば，そのような問題は回避することができる．

### 4 簡易的な干渉検討

ある送信局から放射された電波を受信局が受信する時，その受信電力  $P_R$  は

$$P_R = G_R \times L^{-1} \times G_T \times P_T \quad (8)$$

で与えられる．ここで

- $P_R$  は受信アンテナから出力される電力, W
- $G_R$  は受信アンテナの利得, dimensionless
- $L$  は伝搬損失, dimensionless
- $G_T$  は送信アンテナの利得, dimensionless
- $P_T$  は送信アンテナに入力される電力, W

である．上記のパラメータはすべて周波数の関数であり，被干渉側の使用する周波数  $f$  のときの値で考える．

■干渉閾値 干渉閾値は式 (3) で計算されるが，連続波観測に対するものとスペクトル線観測に対するものの，2 つがあることに注意しなければならない．それぞれの観測パラメータは電波天文局それぞれで異なるが，RA.769 Table 1, 2 に記載されている値を採用すればひとまず問題はないと思われる．またその計算では，仮定する積分時間  $t$  の値に注意しなければならないが，RA.769 Table の注釈に書かれているように，積分時間を 10 時間と仮定して Table の値から 6.3 dB 引いた値を採用すれば安全と言える．

■受信アンテナ利得 受信局つまり被干渉局においては，サイドローブで電波を受信すると考え，受信アンテナとして等方性アンテナを仮定する．よってアンテナの絶対利得は  $G_R = 1$  (= 0 dBi) であり，またアンテナ出力端以降の増幅器による利得は考慮しない．

■伝搬損失 伝搬損失は，自由空間伝搬損失と地形や遮蔽物による損失に分けられるが，干渉検討する際は遮蔽物などが何もないという被干渉側にとって最悪の条件を課し，自由空間伝搬損失のみを考慮すれば安全である．電波が距離  $d$  だけ自由空間を伝搬したときの損失は  $L = (4\pi df/c)^2$  で与えられ，この損失のみを考慮するとき，式 (8) はフリスの伝達公式と呼ばれる．

■送信アンテナ利得と送信電力 送信アンテナの利得  $G_T$  と電力  $P_T$  は、実際に使用する値にもとづく。とりわけ注意すべきは送信電力  $P_T$  の時間変動性であり、もし変動する場合は、その値が「平均電力」なのか「瞬時電力」なのかで検討結果は異なる。いずれにしても「いつ、どこで、どのような電波が放射されるか」という情報、具体的には放射する時刻と場所、放射電波のスペクトログラムなどの情報を、与干渉側と被干渉側で共有することが重要と言える。

■結果として得るべき量 干渉検討で求めるべきは、式 (8) から計算された受信電力  $P_R$  が、式 (3) で与えられる干渉閾値  $P_H$  より小さいことの確認、または  $P_R < P_H$  を満たす距離  $d$  の最小値である。与干渉局と被干渉局が  $d$  だけ離れていれば、干渉は起きないと見なすことができる。