

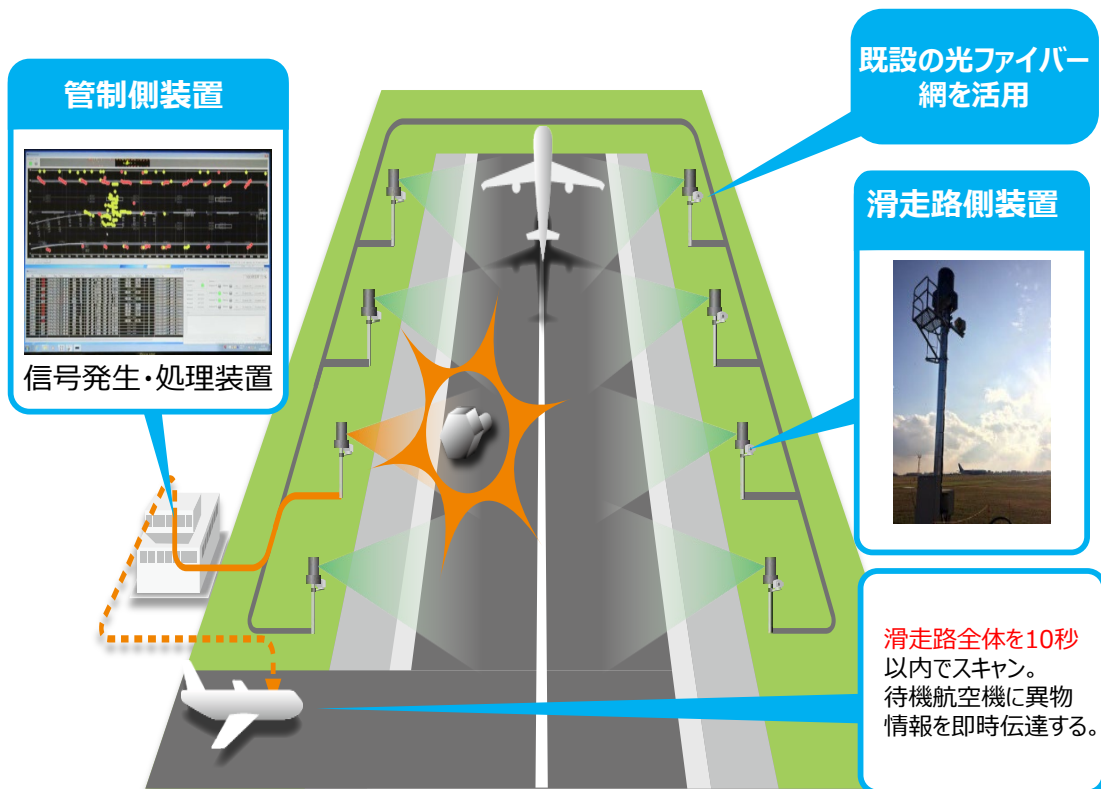
# 空港滑走路における90GHz帯FODレーダーの 導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討

日立国際電気

(令和元年度実施「空港滑走路における90GHz帯FODレーダーの導入に向けた  
周波数有効利用に関する検討」(電波産業会) 報告抜粋)

## 背景と概要

- ✓ 2000年の滑走路上異物(FOD)による航空機墜落が動機。 (注1)
- ✓ FOD検出のため、海外では光学監視カメラやレーダーを導入。
- ✓ 本調査検討では、3cm程度のボルトを検出可能な光ファイバー技術と90GHz帯レーダーを融合した空港FODレーダーシステムを開発し、その調査検討を実施。



## 調査検討の目的

- ◆ 国内での空港FODレーダーシステム導入のため、同一及び隣接周波数帯を利用する他システムとの共用条件を明確にすること。

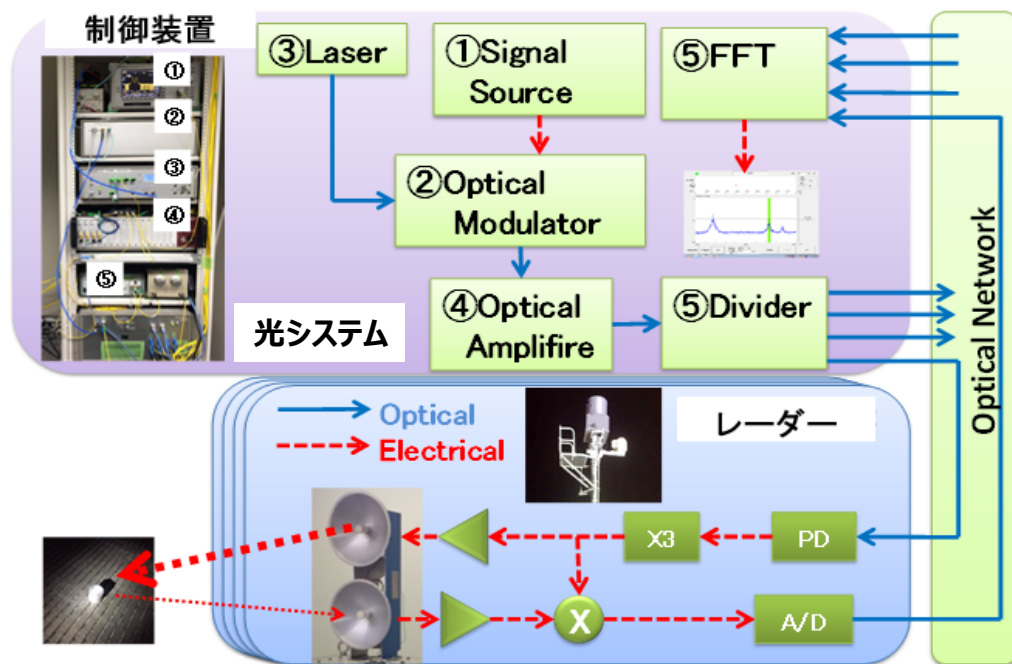
## 主な特徴

- ◆ 滑走路側装置は、滑走路を監視できるよう配置。
- ◆ 既設の光ファイバー網の活用も可能。
- ◆ 管制側装置にて、信号処理等を実施。
- ◆ 滑走路全体を10秒程度でスキャン可能。

(注1) FOD: Foreign Object Debris

## 空港FODレーダーシステム概要

- ✓ 光システムとレーダーの融合システム。
- ✓ 光信号を光ファイバーネットワークにより滑走路に分配。
- ✓ 分配された光信号をPD(Photo Detector)で電気信号に変換、3 逓倍後、アンテナから無線信号を発射。
- ✓ 使用する周波数は、92-100GHzで、周波数連続変調(FM-CW)。



滑走路上的FOD

(注1) FM-CW: Frequency Modulated Continuous Wave

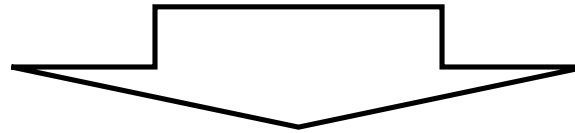
(注2) 標準的な空港の滑走路長は3km程度で、検知範囲500mを考慮すると片側6台で合計12台が標準。他業務との共用検討のため、標準の4倍の台数で検討。

項目	仕様
周波数	92-100GHz
出力電力	20dBm
変調方式	周波数連続変調 (FM-CW) (注1)
アンテナ利得	44dBi
1滑走路あたりの最大レーダー数	48 (注2)

## 他システムとの共用検討方法

## ✓ 共用検討前準備

- ①測定器(スペクトラムアナライザ)の出力レベル限界性能確認。
- ②成田国際空港において実証実験を実施。
  - ・空港FODレーダー周辺の漏洩電力
  - ・空港FODレーダーから発射された滑走路面反射電力



## ✓ 共用検討

- ①該当するITU-R勧告の確認。  
(特に、電波天文業務、地球探査衛星業務など。参考としてITU-R勧告は最終ページに記載。)
- ②共用対象システムとの距離情報等による損失算出。
- ③共用対象システムとの干渉モデル構築と干渉結果。

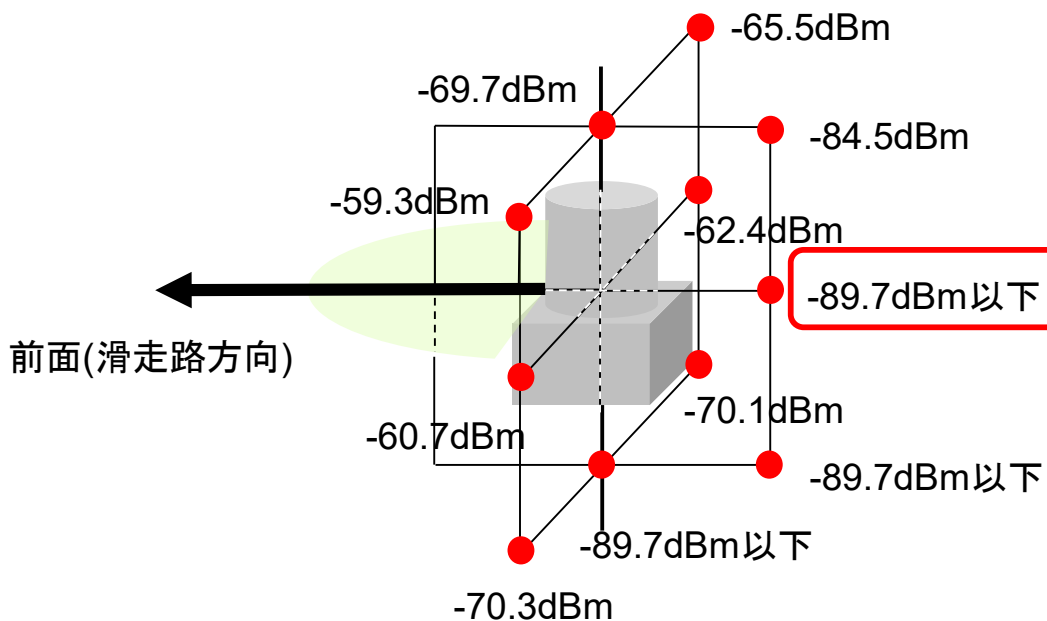
## 共用検討準備

✓ ①測定器(スペクトラムアナライザ)の出力レベル限界確認(入力が-5dBm以上の場合)。

20dBm入力時の離調周波数2MHzにおけるノイズレベル (@93.4GHz) (注1)	PSAシリーズ (キーサイト社)	FSWシリーズ (ローデシュワルツ社)
測定設備付属ミキサによる測定結果	65.8dBc (-70.8dBm) (注2)	74.6dBc (-79.6dBm) (注2)
外部ローカルと基本波ミキサの組合せによる測定結果	64.1dBc (-69.1dBm) (注2)	73.6dBc (-78.6dBm) (注2)

→ 測定値の平均から70dBcを適用。 (注1) スペクトラムアナライザでは、過入力防止のため、信号最大レベルは-5dBm。 (注2) -5dBmとのレベル差

✓ ②空港FODレーダー周辺の漏洩電力測定(PSAシリーズで測定)。



## 測定条件

- ◆電波発射方向は樹脂で、その他は金属で遮蔽。
- ◆レーダー出力部で直接測定できないため、1.5-2.12m離れた箇所で実施。

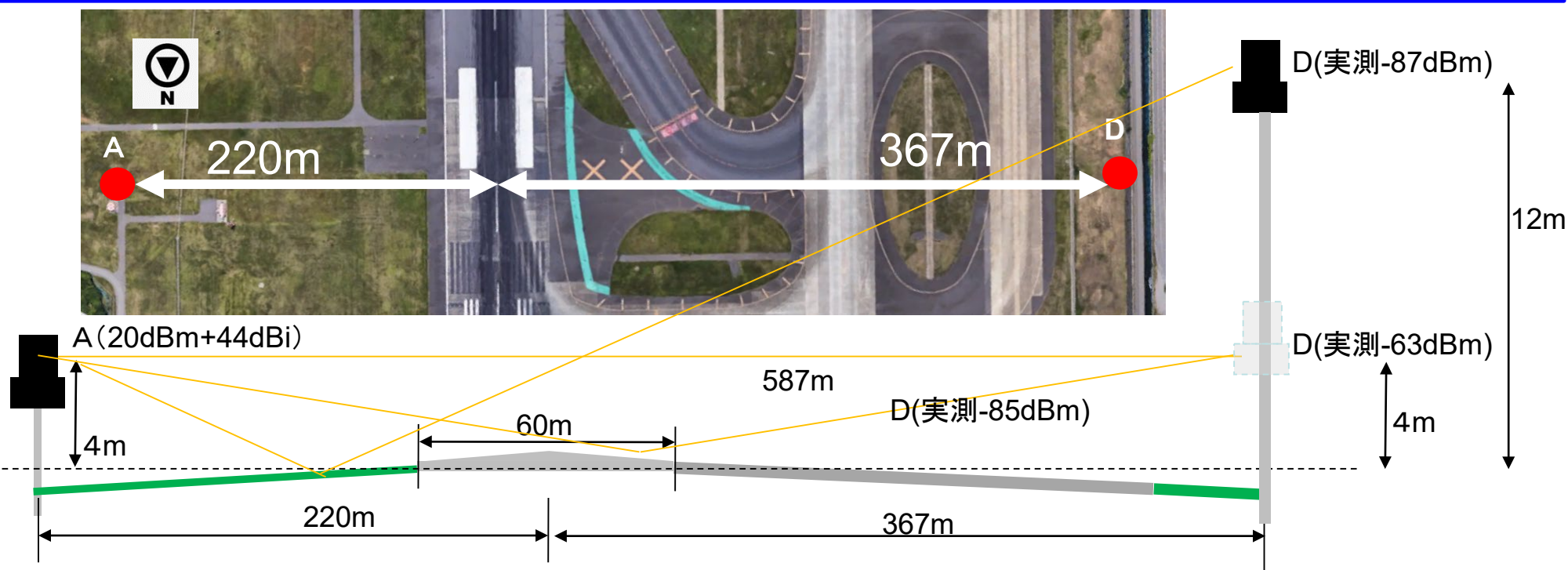
## 主な結果

- ◆前面では、漏洩電力が高くなる傾向がある。
- ◆ノイズレベルはスペクトラムアナライザの受信電力レベルに依存し、受信電力レベルが-5dBm以上では-75dBm程度(70dBc)、受信電力レベルが-50dBm以下では-90dBm程度となる。
- ・レーダーからの直接波による検討：20dBm
- ・レーダーのCW信号から2MHz離れた信号による検討：20-70 = -50dBm
- ・レーダー背面からの波による検討：-89.7dBm (注3)

(注3) FODレーダー干渉許容レベル。-90dBmとしている箇所あり。

## 共用検討準備

- ✓ ③ 空港FODレーダーから発射された滑走路面反射電力
  - ・レーダーAからレーダーDに向けて直接発射し、自由空間損失を測定：-63dBm。  
(自由空間損失計算値：127.46dB@587m, 96GHz →  $20+44-127.46 \div -63$ )
  - ・レーダーAから滑走路面で反射させ、レーダーDで受信測定。  
4m高：-85dBm、12m高：-87dBm → 2dB/8mで減衰
- ✓ レーダー運用では必ず反射させるため、 $-63 - (-85) = 22$ dB減衰。→レーダー出力を $20 - 22 = -2$ dBmとして共用検討(滑走路面で反射させて検討する場合：-2dBm)。



## 周波数共用の検討周波数

## 空港FODレーダーに対する共用対象

- ✓ 総務省 周波数割当(10-275GHz)から、隣接として81-109.5GHzを抜粋、検討対象とした。
- ✓ 主な共用対象システムは、電波天文業務、地球探査衛星業務に関するもの。

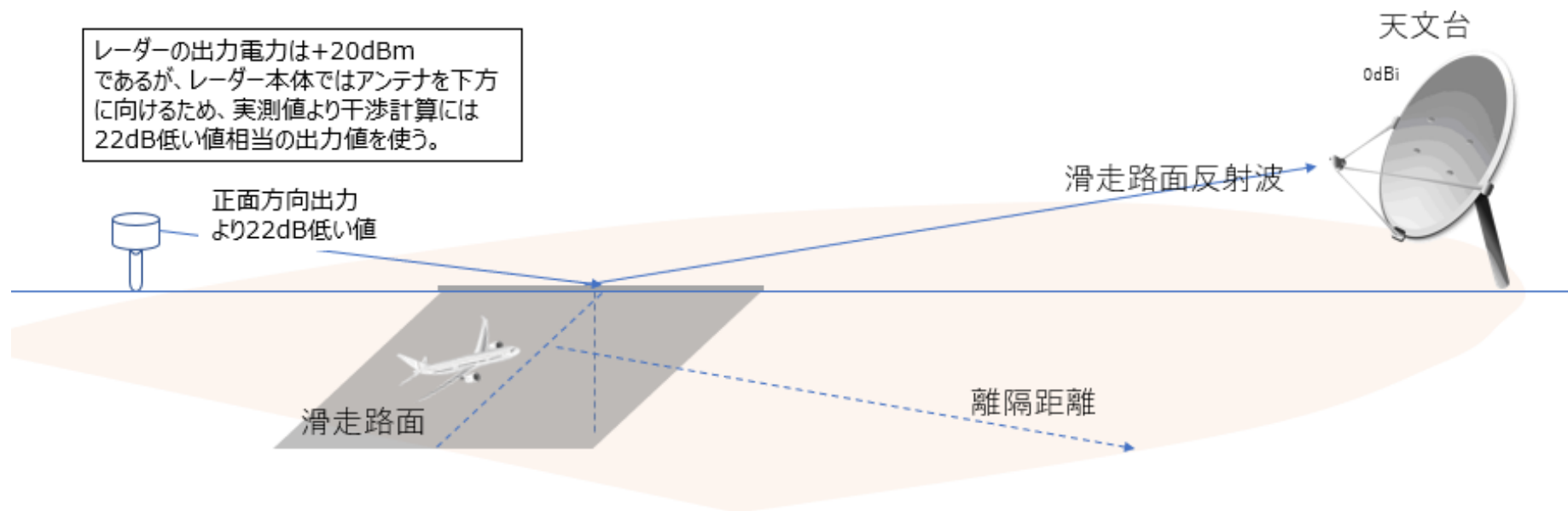
国内分配 (GHz)		国内分配 (GHz)		国内分配 (GHz)	
(4)		(4)		(4)	
	アマチュア アマチュア衛星 電波天文	92-94 J36	固定 移動	J107	宇宙研究 (受動) 電波天文
79-81 J36	無線標定	94-94.1 J284 J285	無線標定 地球探査衛星 (能動) 宇宙研究 (能動) 電波天文	102-105 J36	固定 移動 電波天文
	電波天文 宇宙研究 (宇宙から地球)			105-109.5 J36	固定 移動 宇宙研究 (受動) J286 電波天文
	アマチュア アマチュア衛星	94.1-95 J36	固定 移動	109.5-111.8 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文
81-84 J36 J281	固定 移動		無線標定	111.8-114.25 J36	固定 移動 電波天文 宇宙研究 (受動) J286
	固定衛星 (地球から宇宙) 移動衛星 (地球から宇宙) 電波天文 宇宙研究 (宇宙から地球)	95-100 J36 J268	固定 移動	114.25-116 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文
	アマチュア アマチュア衛星		無線航行 無線航行衛星 無線標定 電波天文		
84-86 J36	固定 移動	100-102	地球探査衛星 (受動)		
	固定衛星 (地球から宇宙) J283 電波天文				
86-92 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文				

隣接

隣接

## 電波天文業務との共用検討（空港FODレーダー → 電波天文業務観測局）

- ✓ 空港FODレーダーの出力は、路面反射を考慮し-2dBm。
- ✓ 空港FODレーダー設置台数は、1滑走路あたり建築限界の48台(標準は12台)とする。
- ✓ 天文台観測局と反対方向にアンテナを設置する場合には、背面漏洩電力-89.7dBmを適用。





## 電波天文業務との共用検討結果（空港FODレーダー → 電波天文観測局）

- ✓ 電波天文観測局と空港間距離が最も短い箇所は、鹿児島空港とVERA入来局で27.167km。
- ✓ 上記でアンテナが正対する場合には-46.22dBでマージン不足となった。
- ✓ 観測局に対して背面方向に配置する場合には、遮蔽効果により85.48dBとマージンが確保できた。
- ✓ 観測局と空港FODレーダーが正対し、回折損失を考慮しない場合、112kmの離隔距離が必要。
- ✓ 参考として東京国際空港と野辺山観測所では、回折損失を考慮し、マージンは確保できた。

記号	項目	鹿児島～ 入来観測局	鹿児島～ 入来観測局	空港～観測局が 112km	東京国際～ 野辺山観測所
A	送信電力	-2dBm	-89.7dBm	-2dBm	-2dBm
B	検討対象台数	48台 (16.81dB)	48台 (16.81dB)	48台 (16.81dB)	288台 (24.59dB)
C	送信アンテナ利得	44dBi	0dBi	44dBi	44dBi
D	帯域内輻射電力密度(8000MHz)	19.78dBm/MHz	-111.92dBm/MHz	19.78dBm/MHz	27.56dBm/MHz
	システム間距離	27.167km	27.167km	112km	126.6km
E	伝搬損失 (注1)	171.6dB	171.6dB	217.8dB	285.89dB(注4) (回折損失有)
F	受信アンテナ利得 (注2)	0dBi	0dBi	0dBi	0dBi
G	到達受信電力密度	-151.81dBm/MHz	-283.51dBm/MHz	-198.05dBm/MHz	-258.33dBm/MHz
H	干渉許容電力密度 (注3)	-198.03dBm/MHz	-198.03dBm/MHz	-198.03dBm/MHz	-198.03dBm/MHz
I	マージン	-46.22 dB	85.48 dB	0.02 dB	60.3 dB

(注1) ITU-R P.525  
-3による。

(注2) ITU-R  
RA.769-2 2.1  
Interference from  
GSO satellites  
Line2

(注4) ITU-R P.526  
-16による。

(注3) ITU-R RA.769-2 TABLE1 8900MHzのThreshold interference levels -189dBWによる。国立天文台より情報提供。

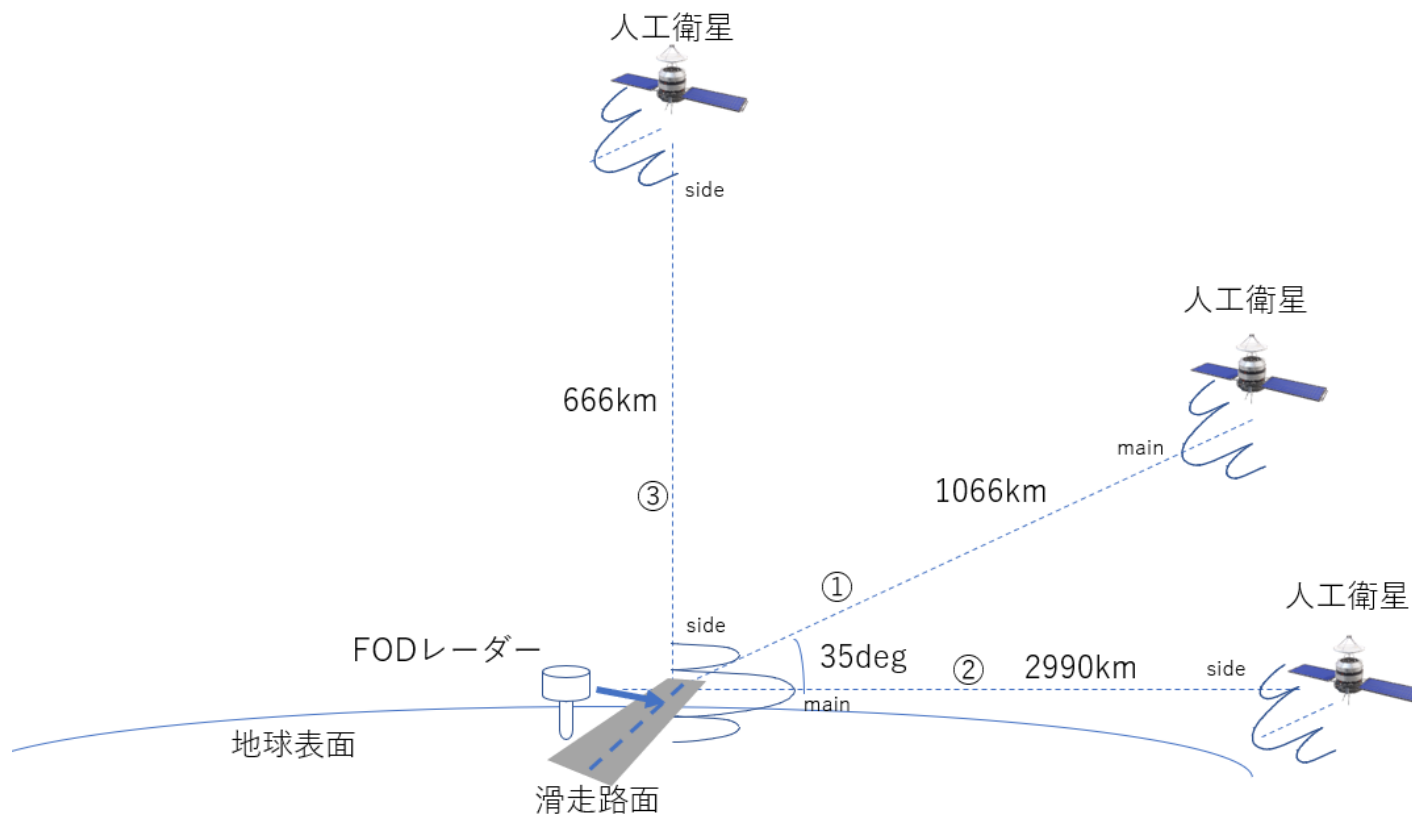
-189dBW → -159dBm → -159-10log(8000)=-198dBm/MHz 計算式：帯域内輻射電力密度D=送信電力A+検討対象台数B+送信アンテナ利得C

計算式：到達受信電力密度G=帯域内輻射電力密度D+伝搬損失E+受信アンテナ利得F、マージンI=干渉許容電力密度H-到達受信電力密度G

## 地球探査衛星業務(受動)との共用検討（空港FODレーダー → 地球探査衛星(受動)）

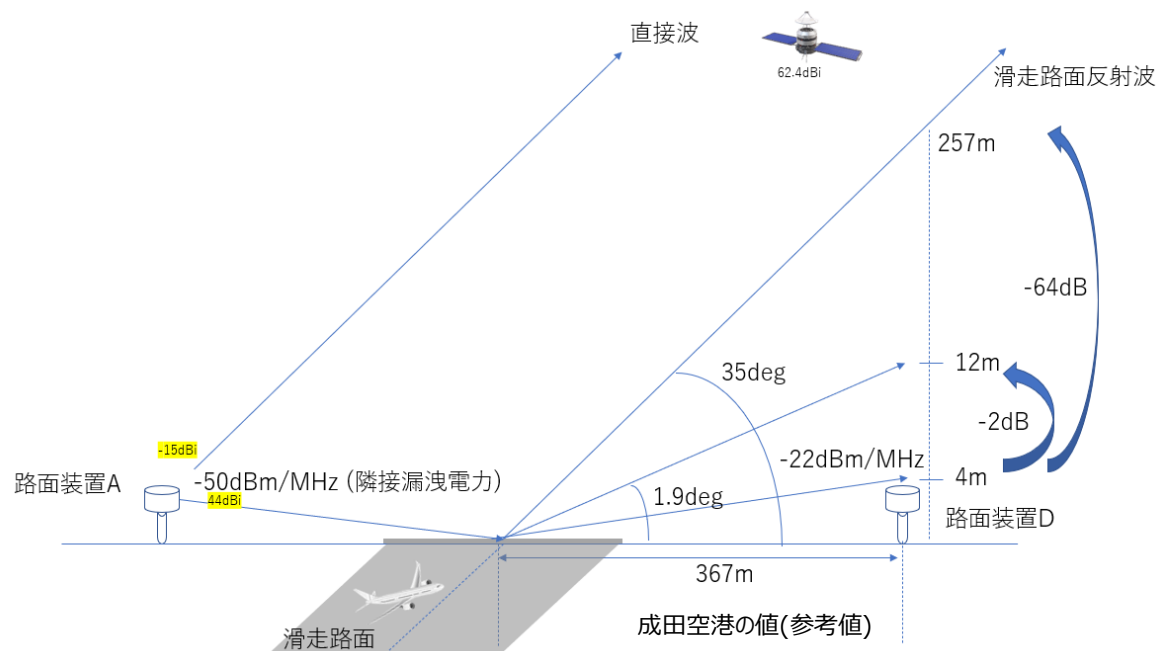
- ✓ 対象となるセンサーは、温室効果ガス・水循環観測技術衛星(GOSAT-GW)に搭載のAMSR3(Advanced Microwave Scanning Radiometer3)。
- ✓ AMSR3の使用周波数は、空港FODレーダーの隣接周波数である86-92GHz。
- ✓ 仰角35°方向からの観測のため、干渉最悪値は下図の①。(注1)

(注1)観測時の仰角35°は、JAXAによる情報提供。



## 地球探査衛星業務(受動)の観測域 (空港FODレーダー → 地球探査衛星(受動))

- ✓ 仰角35°方向で検討。
- ✓ AMSR3観測域は5km x 3km。(注1)
- ✓ 最も滑走路数の多い東京国際空港だと、最大滑走路数6であるが、観測域の制限により滑走路数4で検討を行う。 → 48台x4=192台
- ✓ 隣接チャンネル電力20dBm-70dBc=-50dBm
- ✓ 滑走路面での減衰22dB、FODレーダー上空での減衰64dB。



(注1)観測域5km x 3km はJAXAによる情報提供。

## 地球探査衛星業務(受動)との共用検討結果（空港FODレーダー → 地球探査衛星(受動)）

- ✓ 隣接チャンネル電力20dBm-70dBc=-50dBm
- ✓ 直接波と滑走路面反射波の合計は-172.15dBm/MHz (①+②)。
- ✓ この結果、干渉許容電力密度-159dBm/MHzを下回り、共用可能となる。

(注4) ITU-R RS.2017-0  
による。JAXAより情報提供。  
→ -169dBW/100MHz  
→ -139dBm/100MHz  
→ -159dBm/MHz

記号	項目	直接波	滑走路面反射波
A	隣接チャンネル送信電力密度	-50dBm/MHz	-136dBm/MHz (-50-22-64)
B	検討対象台数	192台 (22.83dB)	192台 (22.83dB)
C	アンテナ利得 (注1)	-15dBi	44dBi
D	帯域外輻射電力密度	-42.17dBm/MHz	-69.17dBm/MHz
E	Radar - 人工衛星距離 (注2)	1066km (-192.39dB)	1066km (-192.39dB) (注4)
F	人工衛星アンテナ利得 (注3)	62.4dBi	62.4dBi
G	受信電力密度	① -172.16dBm/MHz	② -199.16dBm/MHz
H	干渉許容電力密度	-159dBm/MHz	-159dBm/MHz
I	マージン	13.16dB	40.16dB

(注1) ITU-R RS.1813-1による。-15dBiは35°方向の利得。

(注2) ITU-R P.525-3による。

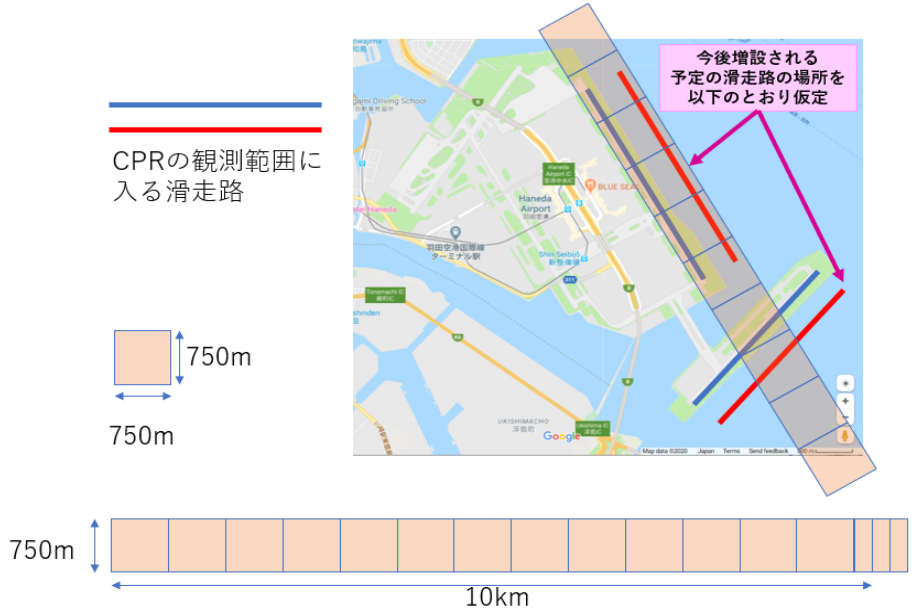
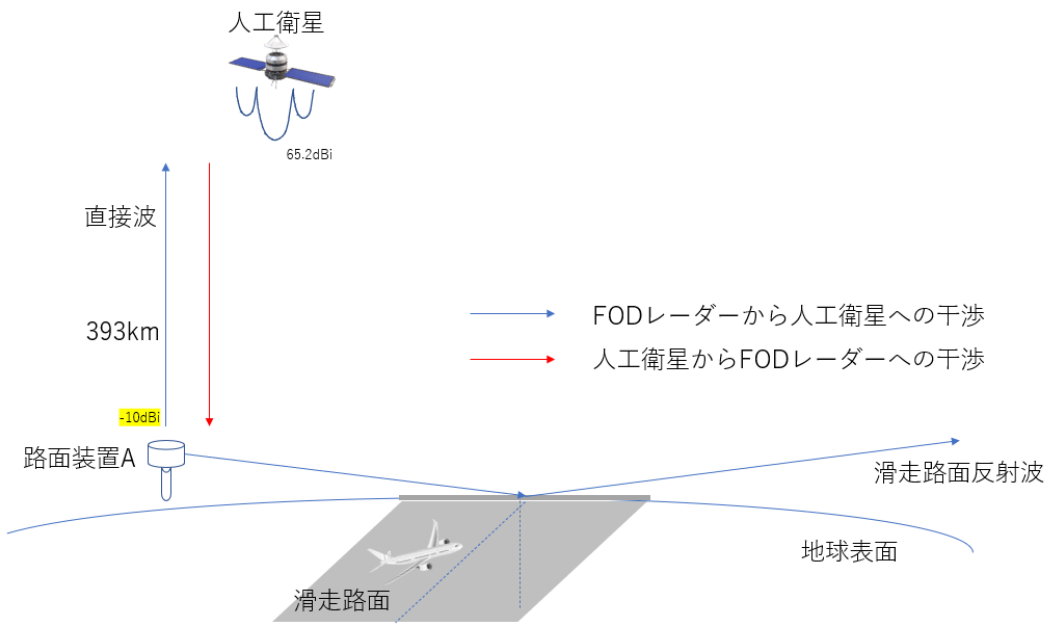
(注3) ITU-R RS.1861-0 Table19, JAXAによる検討及び情報提供。

計算式：受信電力密度G = 隣接チャンネル送信電力密度A + 検討対象台数B + アンテナ利得C + 人工衛星距離E + 人工衛星アンテナ利得F  
マージンI = 干渉許容電力密度H - 受信電力密度G

地球探査衛星業務(能動)との共用検討（空港FODレーダー → 地球探査衛星(能動)）

- ✓ 対象となるセンサーは、EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)衛星に搭載されるCPR (Cloud Profiling RADAR)。
- ✓ 使用周波数は、94-94.1GHz。
- ✓ CPRは、人工衛星の直下を観測。このため、滑走路反射は検討不要。(注1)
- ✓ 観測域は750m x 750mで、10km積分モードで観測するため、750m x 10kmで検討。(注1)
- ✓ 対象となる空港FODレーダー数は、 $48 \times (2 + 2/3) \div 128$ 台。

(注1) JAXAによる検討及び情報提供。



## 地球探査衛星業務(能動)との共用検討 (空港FODレーダー → 地球探査衛星(能動))

- ✓ 空港FODレーダー帯域内では、受信電力が-87.74dBm(①)で共用不可。
- ✓ チャンネル回避(94-94.1GHzを使用しない)を行い、空港FODレーダー帯域外では、受信電力密度が-157.57dBm/MHz(②)となり共用可能。

記号	項目	帯域内 (チャンネル内)	項目	帯域外 (チャンネル回避)
A	送信電力	20dBm	送信電力密度	-50dBm/MHz
B	検討対象台数	128台 (21.07dB)	検討対象台数	128台 (21.07dB)
C	アンテナ利得 (注1)	-10dBi	アンテナ利得 (注1)	-10dBi
D	帯域内電力	31.07dBm	帯域外輻射電力密度	-38.93dBm/MHz
E	Radar - 人工衛星距離 (注2)	393km (-184.02dB)	Radar - 人工衛星距離 (注2)	393km (-184.02dB)
F	人工衛星アンテナ利得	65.2dBi	人工衛星アンテナ利得	65.2dBi
G	受信電力 (注3)	① -87.74dBm	受信電力密度 (注3)	② -157.74dBm/MHz
H	干渉許容電力 (注4)	-128dBm	干渉許容電力密度 (注4)	-122.77dBm/MHz
I	マージン	-40.26dB	マージン	34.97dB

(注1)ITU-R RS.1813-1による。(注2)ITU-R P.525-3による。(注3)JAXAによる情報提供。(注4)ITU-R RS.1166-4をもとにJAXAにて積分によるSN比向上を考慮し、算出、情報提供。電力密度は0.3MHzを考慮。

計算式：受信電力(密度)G = 送信電力(密度)A + 検討対象台数B + アンテナ利得C + 帯域内(外輻射)電力(密度)D + 人工衛星距離E + 人工衛星アンテナ利得F  
マージンI = 干渉許容電力(密度)H - 受信電力(密度)G

地球探査衛星業務(能動)との共用検討（地球探査衛星(能動) → 空港FODレーダー）

- ✓ CPRの瞬時可視範囲は750m x 750mであるが、CPRの3dBビーム幅0.095°を考慮し、対象となるFODレーダー数は1とした。
- ✓ 94-94.1GHzを空港FODレーダーで使用しないとしたとき、帯域外送信電力は最大1.55dBmで、参照帯域幅は0.3MHzである。
- ✓ 空港FODレーダーは真上から受信するため、空港FODレーダー受信アンテナ利得は0dBiとする。
- ✓ 干渉許容電力密度-90dBm/MHzを下回り、共用可能。

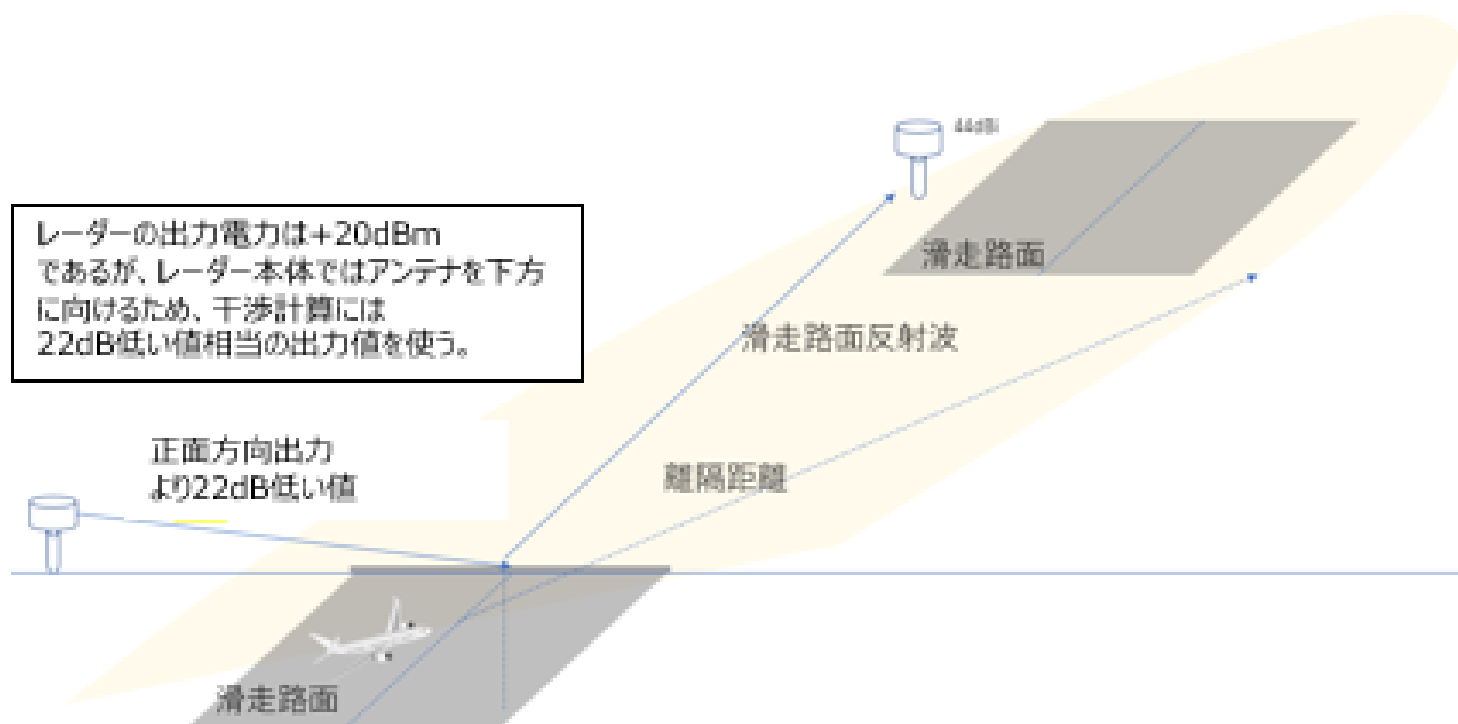
記号	項目	被干渉
A	帯域外送信電力密度 (94-94.1GHz除く) (注1)	1.55dBm/0.3MHz
B	帯域外送信電力密度	6.78dBm/MHz
C	人工衛星アンテナ利得	65.2dBi
D	帯域外送信電力密度	71.98dBm/MHz
E	Radar - 人工衛星距離 (注2)	393km (-184.02dB)
F	受信アンテナ利得	0dBi
G	受信電力密度	-112.03dBm/MHz
H	干渉許容電力密度 (注3)	-90dBm/MHz
I	マージン	22.03dB

(注1)ITU-R RS.1813-1による。  
 (注2)ITU-R P.525-3による。  
 (注3)成田空港での実測値による。

計算式：受信電力密度G = 帯域外送信電力密度B + 人工衛星アンテナ利得C + 人工衛星距離E + 受信アンテナ利得F  
 マージンI = 干渉許容電力密度H - 受信電力密度G

## 空港FODレーダー同士の共用検討 (空港FODレーダー → 空港FODレーダー)

- ✓ 1つの空港にある複数台の空港FODレーダーが、他の空港の1台のFODレーダーに対する干渉を検討。
- ✓ 最悪条件として、空港間の電波伝搬には回折損失なしと仮定。





## 空港FODレーダー同士の共用検討 (空港FODレーダー → 空港FODレーダー)

- ✓ 南大東島空港～北大東島空港間(国内最小距離7.2km、滑走路数1)の場合、異なる周波数を使用する(送信電力を-50dBm)ことにより共用可能。
- ✓ 同一周波数帯で、6滑走路288台(6x48)の場合、所要離隔距離は78km。
- ✓ 異なる周波数帯では、所要離隔距離は8kmまで可能。

記号	項目	最小距離/ 同一周波数	最小距離/ 異周波数	最大設置数/ 同一周波数	最大設置数/ 異周波数
A	送信電力	-2dBm	-50dBm	-2dBm	-50dBm
B	検討対象台数	48台 (16.81dB)	48台 (16.81dB)	288台 (24.59dB)	288台 (24.59dB)
C	送信アンテナ利得 (注1)	44dBi	44dBi	44dBi	44dBi
D	帯域内輻射電力	58.81dBm	10.81dBm	66.59dBm	18.59dBm
	システム間距離	7.2km	7.2km	78km	8km
E	伝搬損失 (注2)	152.07dB	152.07dB	201.09dB	153.31dB
F	受信アンテナ利得 (注1)	44dBi	44dBi	44dBi	44dBi
G	到達受信電力	-49.26dBm	-97.26dBm	-90.49dBm	-90.71dBm
H	干渉許容電力 (注3)	-90dBm	-90dBm	-90dBm	-90dBm
I	マージン	-40.74dB	7.26dB	0.49dB	0.71dB

(注1) ITU-R RS.1813-1による。 (注2) ITU-R P.525-3による。 (注3) 成田空港の実測値による。

計算式：到達受信電力G = 送信電力A + 検討対象数B + 送信アンテナ利得C + 伝送損失E + 受信アンテナ利得F  
マージンI = 干渉許容電力H - 到達受信電力G

## 提言(主な技術的条件) 1/5

## ✓周波数

92GHz から100GHz までとすること。

ただし、94GHz から94.1GHz までについては、地球探査衛星業務のうち能動業務を保護する観点から電力を出力しないことが必要とされる。

## ✓変調方式

FM-CW 変調（周波数連続変調）方式とする。

## ✓等価等方輻射電力

空港内の滑走路付近に送信点を設置した条件において、1 送信点からの実効輻射電力は64dBm 以下となるようにすること。

## ✓等価等方輻射電力

1 送信点からの実効輻射電力は、64dBm 以下となるようにすること。

## ✓送信空中線の絶対利得

44dBi 以下とすること。

## ✓偏波面

直線偏波（垂直及び水平偏波）とすること。

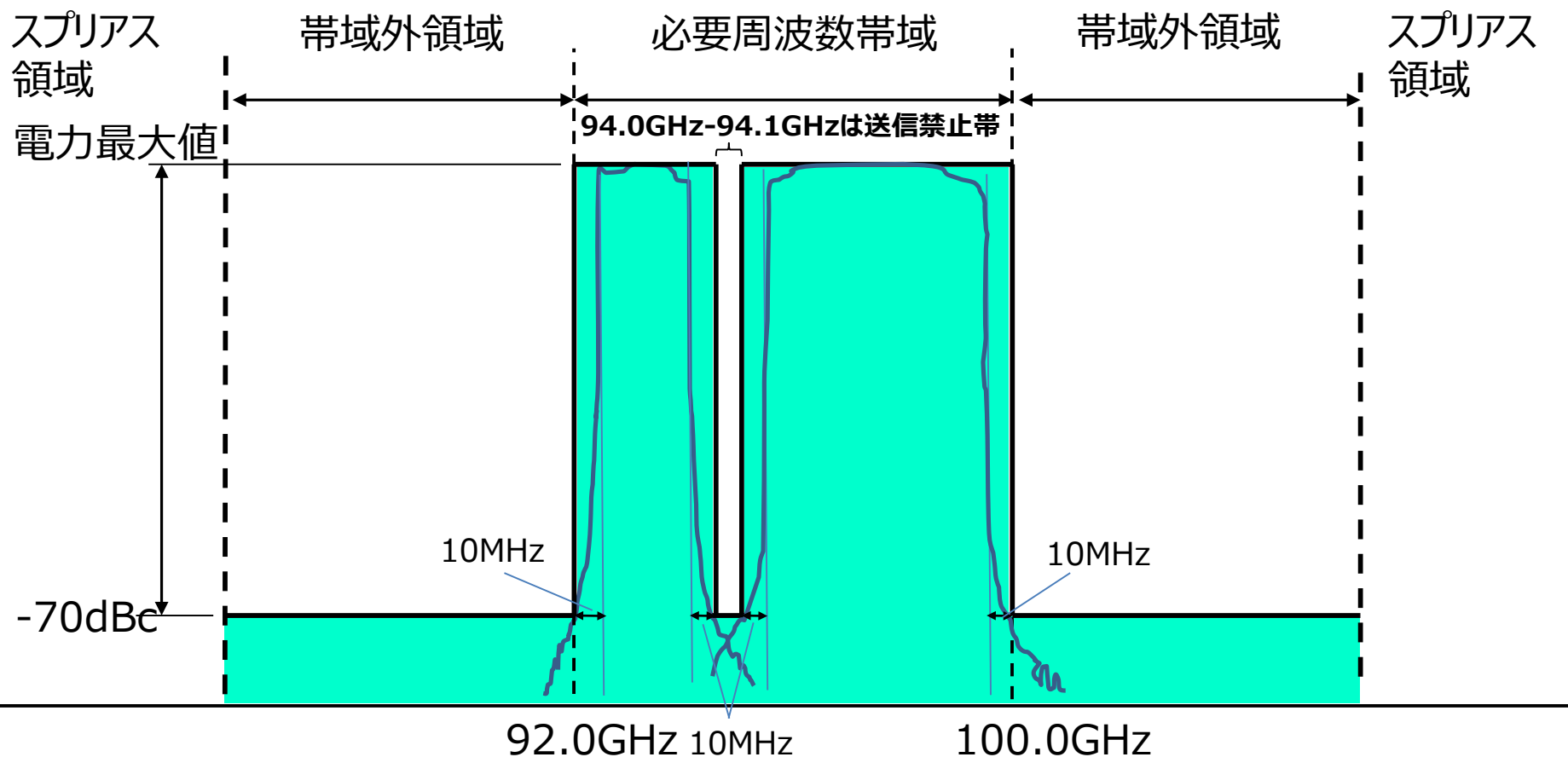
提言(主な技術的条件) 2/5

✓送信スペクトラムマスク

送信禁止帯：94.0～94.1GHz

帯域外領域、スプリアス領域：-70dBc以下

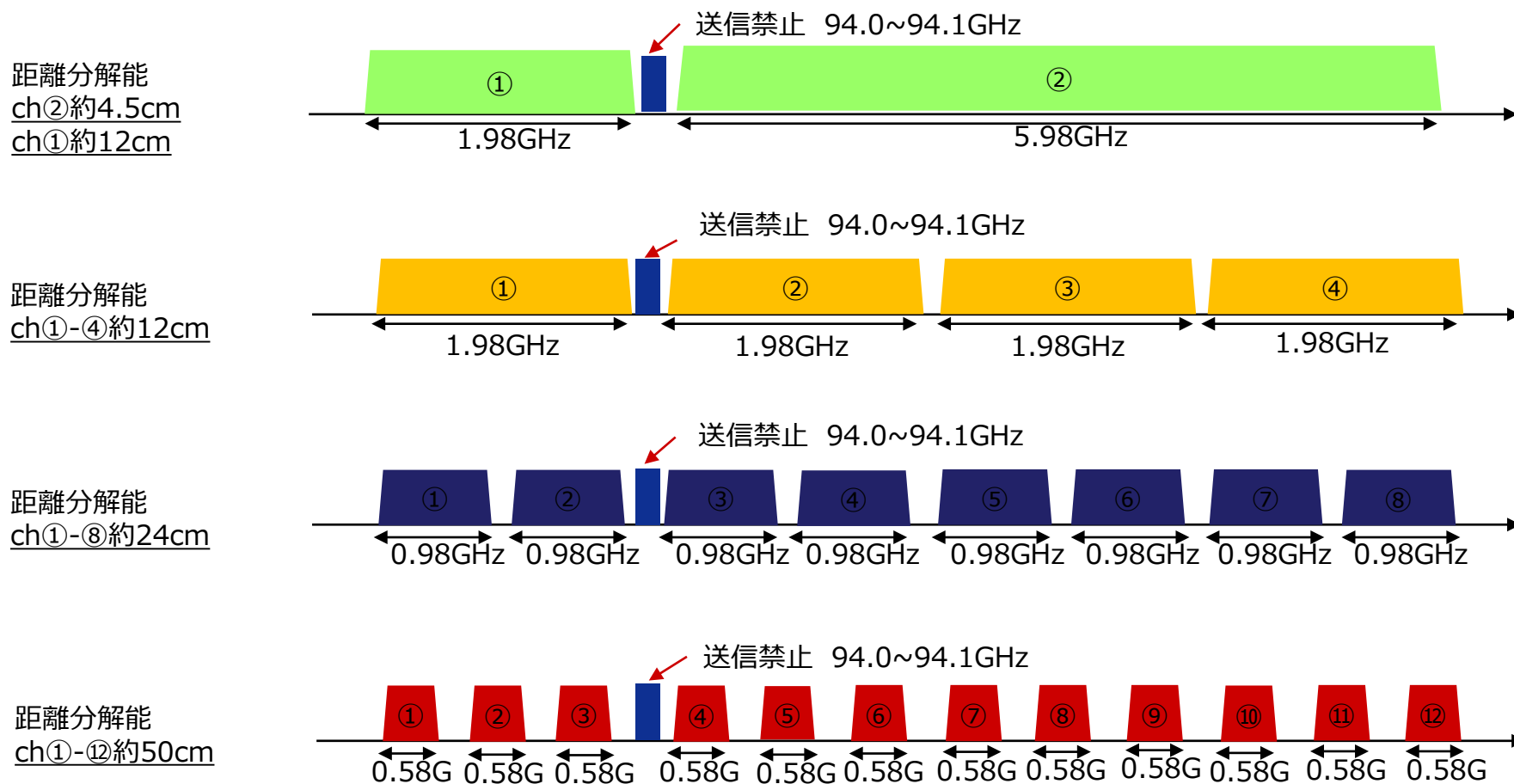
(動的な干渉回避等で共用可能な場合はこの限りではない)



## 提言(主な技術的条件) 3/5

## ✓チャンネル配置

システム間における周波数共有及び距離分解能のニーズの観点から、以下のように規定する。



## 提言(主な技術的条件) 4/5

## ✓送信設備に対する対策等

空港FODレーダーの出力による他共用システムに対する干渉を回避するため、輻射を停止する出力機能を設けること。

## ✓同期機能

同一空港内の複数滑走路において、空港内のすべての空港FODレーダーの回転同期を実施すること。

## ✓ビーム放射方向

空港FODレーダーは、そのビーム正面の放射方向が水平面より1°以上下方になるように設置すること。

## 提言(主な技術的条件) 5/5

## ✓電波天文の受信設備への干渉回避

設置場所周辺半径112km以内に、81GHzから109.5GHzまでの周波数のうち総務省告示で総務大臣が指定した周波数を受信する電波天文の受信設備がある場合には、電波天文局方向を基点(0°)として、水平方向に0°から+80°及び0°から-80°の方向における放射電力が-89.7dBm以下となるよう、遮蔽板を設ける等の対策を行い、電波天文の受信設備への干渉を回避すること。

## ✓空港間同士の干渉回避

- 相互に干渉がない離隔距離を考慮し、空港FODレーダーを設置すること。
- 必要とされる離隔距離に満たない場合は、使用するチャネル配置や遮蔽板等によるシールド、設置台数の制限等により干渉を回避すること。

## ✓干渉を回避するための設置とその性能の維持

位置精度の向上や干渉回避のため、滑走路内の定位置にある目標物からの反射電力に対してキャリブレーションができるようにし、常に空港FODレーダー性能の維持を図ること。

## (reference) Relevant ITU-R Recommendation

No.		page
RS.1813-1	Reference antenna patter for passive sensors operation in the Earth exploration-satellite service(passive) to be used in compatibility analyses in the frequency range 1.4-100 GHz	11, 13, 14, 16
RA.769-2	Protection criteria used for radio astronomical measurements	8
P.525-3	Calculation of free-space attenuation	8, 11, 13, 14, 16
RS.2017-0	Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing	11
RS.1166-4	Performance and interference criteria for active spaceborne sensors	13
RS.1861-0	Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (passive) systems using allocations between 1.4 and 275 GHz	11
P.526-14	Propagation by diffraction	8