

深宇宙彫刻「ARTSAT2:DESPATCH」による 深宇宙からの微弱電波の共同受信実験へのご協力をお願い

ARTSATプロジェクトチーム

ARTSATプロジェクトでは、2014年12月の打ち上げを目指して、深宇宙彫刻「DESPATCH」を開発中です。本資料は、アマチュア無線家のみなさまに向けて、DESPATCHが深宇宙から送信する電波の共同受信をお願いするものです。

なお、本資料は要約版であり、今後、詳細を別の資料にて公開する予定です。本資料をご覧になった上で、本プロジェクトにご興味のある方はそちらもあわせてご覧ください。

版数	発行日	改訂履歴
第1版	2014年7月8日	初版発行
第1.0.1版	2014年7月11日	CWの送信周波数を437.325MHzに訂正

1. 深宇宙彫刻「ARTSAT2:DESPATCH」

宇宙と芸術の新たな関係を探求するARTSATプロジェクトでは、大きさ10cm角、重さ約1.8kgという1U CubeSat規格の芸術衛星「ARTSAT1:INVADER¹」に続いて、深宇宙彫刻「ARTSAT2:DESPATCH²」を開発中です。大きさ約50cm立方、重量約30kgのこの宇宙機は、2014年12月に打ち上げ予定のJAXA H-IIAロケットにより、小惑星探査機「はやぶさ2」の相乗りペイロードとして地球脱出軌道に投入され、人工小惑星となる予定です。

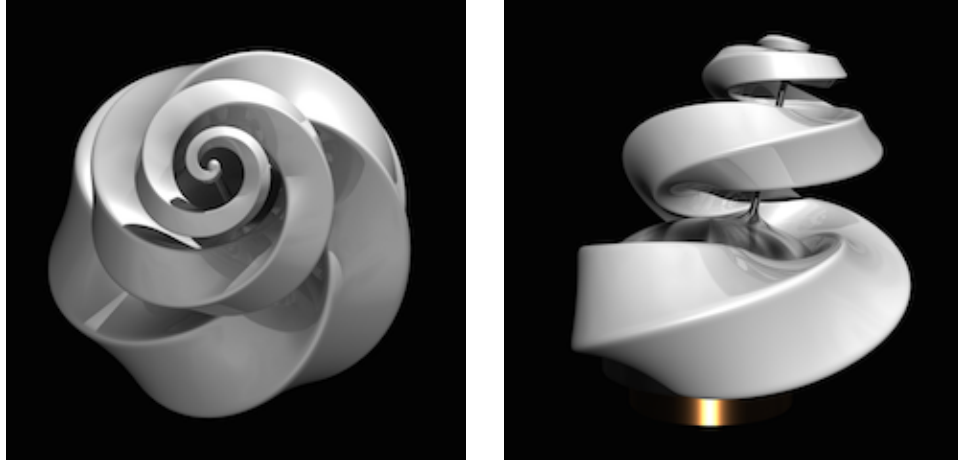


図1.1 深宇宙彫刻「ARTSAT2:DESPATCH」の外観

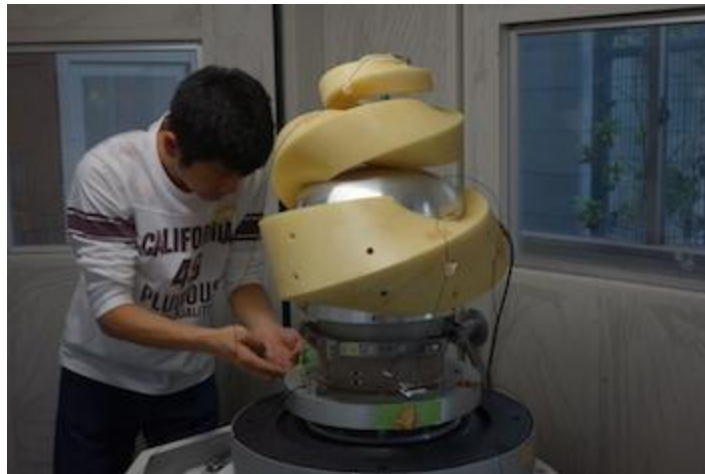


図1.2 DESPATCHのエンジニアリングモデル（試験用一次試作品）

DESPATCHは、以下のような芸術ミッションと、技術ミッションを行います。

芸術ミッション

- 宇宙機を地球脱出軌道に投入することで、彫刻作品を深宇宙へと送り出す（「深宇宙彫刻」の実現）

¹ INVADER (Interactive Vehicle for Art and Design Experimental Research) : <http://artsat.jp/invader>

² DEep SSpace Amateur Troubadour's CHallenge (深宇宙アマチュア吟遊詩人の挑戦) の略称です。

- 芸術家の分身として深宇宙に送りだした宇宙機から、詩を生成して地球へと送信する（「宇宙生成詩」の遠隔創造）

技術ミッション

- 多くのアマチュア無線家の協力による深宇宙からの微弱な電波の共同受信実験
- 3Dプリンタ造形物の宇宙機搭載実証と一般の宇宙機への応用

芸術ミッションの「宇宙生成詩」とは、宇宙機搭載のセンサーの値（温度など）をもとに、宇宙機搭載の計算機が特定のアルゴリズムにもとづいて英語で生成するセンテンスです。技術ミッションの共同受信実験については、以降で詳細を説明します。

こうしたミッションを実現するために、DESPATCHは通常の宇宙機とは異なる、以下のような特徴を有しています。

1. 宇宙機が電波を連続送信する期間は、地球脱出軌道に投入後、地球から約300万kmの距離に到達するまでの最大一週間とする
2. 電源は一次電池のみとし、太陽電池を搭載しないことで、造形作品としての宇宙機の外観の自由度を高める
3. ペイロードが自律的に機能するため、通信はCWビーコン³の送信のみとし、地上からのコマンドアップリンクは行わない

2. 共同受信実験

DESPATCHは姿勢制御装置を持たず、回転した状態で地球脱出軌道に投入されるため、指向性の強いアンテナを地球に向けて電波を送ることはできません。したがって、宇宙機の自転によりフェージングの生じた、極めて弱い電波が地球に届くこととなります。宇宙機は、この電波によって、ハウスキーピングデータ（健康状態など、宇宙機のステータス情報）および、搭載センサーのデータから軌道上で制作された宇宙生成詩を送信します。

ARTSATプロジェクトチームでは、世界各地のアマチュア無線家のみなさまに、この非常に弱い電波の共同受信をお願いしたいと考えています。「1. 深宇宙彫刻「ARTSAT2:DESPATCH」」に記載したとおり、DESPATCHの技術ミッションの1つとして、微弱電波の共同受信実験を行います。この実験では、単独の大型アンテナを使用するのではなく、多数のアマチュア無線家が受信したデータの数々を、インターネットを使って一ヶ所に集めて再結合することで、極めて遠方からの送信データを復元する「協調ダイバーシティ通信」の実験を行います。このような実験によって、アマチュア無線家が有する比較的小型のアンテナでも、それらを複数集めることで、巨大なパラボラアンテナに匹敵するような微弱電波の受信が可能になるのかどうかを、検証したいと考えています。図2.1には、この共同受信実験のイメージを示しています。

³ DESPATCHのCWでは、モールス信号だけではなく、独自符号による信号も送ります。よって、本資料で単に「CW」ないしは「CWビーコン」というとき、それはモールス信号だけに限りません。

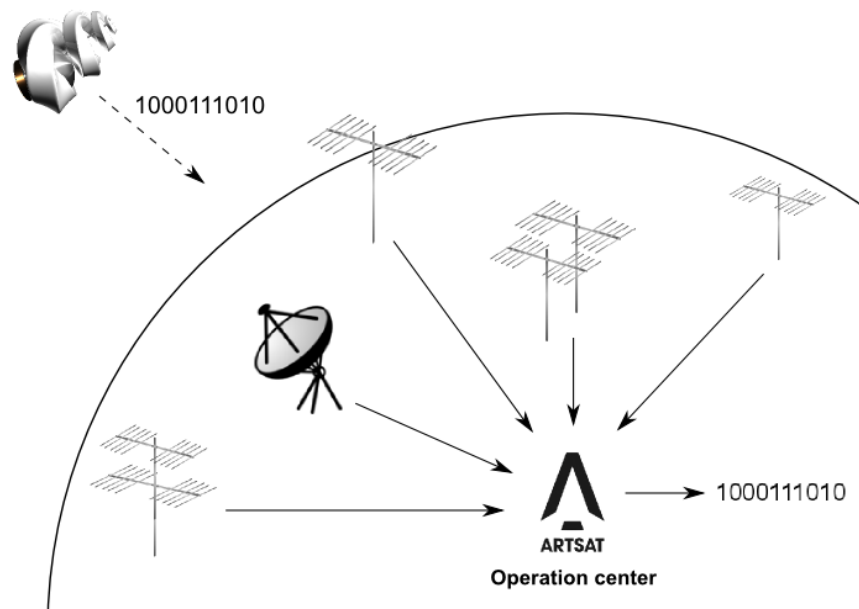


図2.1 共同受信実験のイメージ

この共同受信実験を成功させるためには、なるべく多くのアマチュア無線家の協力が必要です。そこで、送信電波の周波数としては、アマチュア衛星で最も一般的に使用され、より局数の多い430MHz帯を採用しました。また、変調方式としては、最もシンプルな方式であるCW（搬送波のオン/オフで、1ビットを表現）を採用します。複雑な変調方式の電波を低出力で送るのではなく、できる限りシンプルな変調方式の電波をできる限り高出力で送ることによって、受信の確実性を高めます。また、シンプルな変調方式であれば、受信の際に各局で独自に工夫を凝らすことが比較的容易であるため、地上局の多様性を利用した異種冗長化を図ることもできます。

この共同受信ミッションを達成するため、表2.1に示すような仕様の送信機を宇宙機に搭載します。この通信機は宇宙機搭載のタイマーICと計算機によって駆動され、およそ7Wの送信電力がモノポールアンテナから放射されます。

表2.1 宇宙機搭載の送信機の諸元

送信機出力	7 W
送信周波数	437.325 MHz
変調方式	CW
電源電圧	+7 V DC
消費電力	最大 24.5 W
周波数安定度	最大 ± 0.3 ppm (± 130 Hz)

3. 宇宙機の可視時間

地球脱出軌道に投入される宇宙機は、地上からは惑星や彗星のようにみえます。つまり、地球を周回する低軌道の衛星とは異なり、DESPATCHは天球上をゆっくりと移動し、およそ数時間は連続してみえる状態（電波が受信できる状態）にあります。

宇宙機からの電波を受信することができるのは、仰角が0度以上の時間帯に限られます。本資料では、この時間帯のことを「可視時間」と書きます。DESPATCHの投入される軌道をシミュレートし、世界の各地域における宇宙機の可視時間を予想しました⁴。図3.1には、各地域から選択した5つの都市（東京、シドニー、ベルリン、ボストン、プエノスアイレス）における宇宙機の可視時間を黒い太線で示しています。日時は、世界標準時（UTC）で表記されていることに注意してください。

図3.1によると、日本（東京）におけるDESPATCHの可視時間帯は、毎日およそ9時から18時（UTC）の9時間だけです。しかし、海外のアマチュア無線家の受信協力を得ることができれば、24時間体制での電波の受信が可能になります。

DESPATCHは地球脱出軌道に投入されるため、ロケットからの分離後は急速に地球から遠ざかります。軌道シミュレーションの結果によると、分離後およそ16時間で地球から月までの距離（38万km）に到達し、分離後およそ33時間でその往復距離（77万km）に到達します。図3.2には、宇宙機の地球中心からの距離の推移を示しています。図3.1と図3.2を参照することで、それぞれの可視時間で、宇宙機が地球からどのくらい遠くにあるのかを調べることができます。

なお、DESPATCHは地球脱出軌道に投入されるため、TLE⁵（二行軌道要素形式）は提供されません。ARTSATプロジェクトでは、各局での宇宙機の見え方（宇宙機の仰角、方位角および受信周波数などの時系列データ）を記載したテキストファイルをダウンロードできるような、専用のwebページを用意する予定です。アマチュア無線家の方々には、このテキストファイルの内容にしたがって自局のハードウェアを制御し、宇宙機を追尾するソフトウェアの開発をお願いしたいと考えています。

⁴ このシミュレーションは、2014年6月現在の打ち上げ情報にもとづいて計算したものです。今後の打ち上げ情報の詳細化にともなって、結果が大きく更新される場合があります。

⁵ 衛星の軌道を記述するテキストフォーマットで、地球周回衛星の追尾のための軌道計算に使用されます。

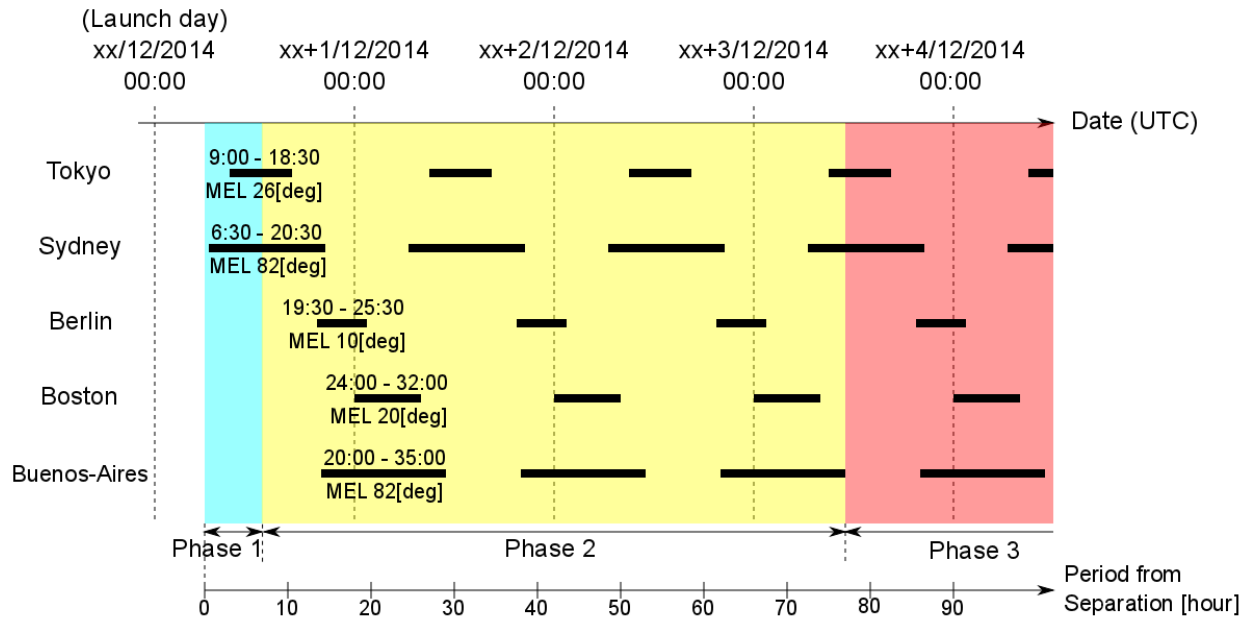


図3.1 世界の各地域における宇宙機の可視時間とミッション・フェーズ

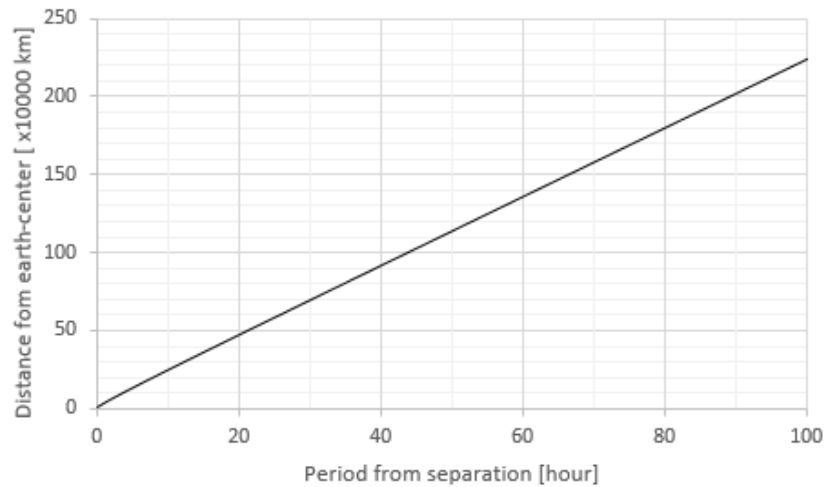


図3.2 地球の中心と宇宙機との距離の推移

4. 運用計画

DESPATCHのミッションとして、ハウスキーピングデータ、宇宙生成詩、宇宙機の温度に応じた断続信号という3つのデータを、地上で受信したいと考えています。そこで、表4.1に示すように、地球からの距離に応じてミッション期間を3つのフェーズに分け、各フェーズでCWによって送信するデータを変えます。

なお、図3.1の色分けは、このフェーズにしたがってなされたものです。図3.1を参照していただければ、各フェーズの期間と切り替えのタイミングが一目瞭然となっています。また、各フェーズの切り替えのタイミングとしては、世界各地の可視時間を考慮に入れて決めており、すべての受信協力者に受信の機会を使っただけのように努めています。

表4.1 通信モードごとの送信データの種別

フェーズ	地球からの距離	地上で受信するデータ
フェーズ1	～20万km	モールス信号によるハウスキーピングデータ
フェーズ2	20万km～173万km	独自符号による宇宙生成詩
フェーズ3	173万km～	宇宙機の温度に応じた間隔で送信される断続信号

まず、フェーズ1では、モールス信号によるハウスキーピングデータを地上で受信します。この信号は、宇宙機の健康状態と動作状況の確認（ヘルスチェック）を行うためのものです。宇宙機のヘルスチェックは、分離直後だけに行うことを想定しているため、図3.1に示すように、日本における最初の可視時間の前半まで（距離にしておよそ20万kmまで）をフェーズ1としています。なお、このモールス信号については、SNSなどを利用して各局での受信状況を全体で共有できる仕組み⁶を作りたいと考えています。

次に、フェーズ2では、独自符号による宇宙生成詩の共同受信実験を行います。

この宇宙生成詩の受信は、宇宙機が地球から遠ざかるにつれて電波が弱くなり、信号がとぎれとぎれにしか聞こえない状況を想定しています。1つの地上局だけでは、このようなとぎれとぎれの信号はを正しく受信することは困難です。

そこで、世界各地のアマチュア無線家にご協力いただき、各局で受信されたデータ（ビット列）を、本プロジェクトの運営する「ミッション運用センター」に送信していただきます。ミッション運用センターでは、世界中のアマチュア無線局から送られてきたデータの時刻同期をとり、1つの詩として復元します。詩の復元方法としては、データが重複する部分については多数決によるエラー処理を行い、それ以外の部分ではORの処理を施すといったシンプルな手法を考えています。図4.1にはこの復元プロセスの例として、「DESPATCH」という単語を、5人のデータから復元する様子を示しています。赤い文字は、多数決によって棄却（訂正）されるデータを表しています。詩の仕様（符号体系やプロトコル）については、「5. 信号の体系」で説明します。

このようなデータの時刻同期のためには、データを取得するパソコンの時刻を正確に合わせた上で、受信データの各ビットにタイムスタンプを付与していただく必要があります。時

⁶ 例えば、「ARTSAT1:INVADER」の運用では、Facebook (<https://www.facebook.com/artsat>) のタイムライン上で、その日の運用の内容や、各局での受信状況、受信されたデータを共有しています。また、専用のwebページ (<http://api.artsat.jp/report/>) を通じて世界各地から受信報告をいただいております。これらの報告はINVADERのTwitterアカウント (https://twitter.com/INVADER_ARTSAT) から配信しています。

刻取得の方法については自由としますが、例えばインターネットのNTP⁷によって時刻情報を取得する方法などが考えられます。

最後に、フェーズ3では、宇宙機の温度に応じて送信間隔が変化するような断続信号を、地上で受信します。このような断続信号を送ることで、きわめて微弱な電波でもその変化さえ捉えることができれば、宇宙機のおおよその温度を知ることができると考えています。

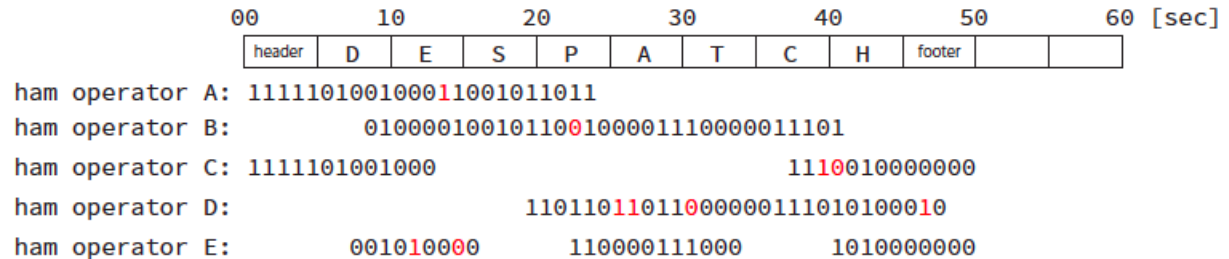


図4.1 各局で受信されたデータの統合プロセス

5. 信号の体系

「4. 運用計画」では、ミッション期間を3つのフェーズに分け、各フェーズで、モールス信号によるハウスキーピングデータ、独自符号による宇宙生成詩、断続信号による宇宙機の温度という3種類のデータを受信することを説明しました。

各フェーズでは、これらのデータの送信期間と、通信機の発熱を抑えるために送信を行わない期間、および宇宙機の軌道決定を目的とした無変調キャリアの送信期間という3つの期間を設けた、1つの「サイクル」を繰り返します。このサイクル内での3つの期間に対する時間割り当てについては、今後、宇宙機の熱解析の結果を考慮に入れた上で決定します。

以降では、各フェーズでCWによって送信するデータの信号体系について説明します。表5.1には、モールス信号と宇宙生成詩それぞれの符号体系と信号速度を示しました。

まず、ハウスキーピングデータを送るモールス信号に関しては、信号速度を6WPMと設定しています。これは、多摩美術大学の主地上局での回線計算の結果と、耳で聞きやすいモールスの速度を考慮に入れた結果です。

次に、宇宙生成詩を送る独自符号としては、1文字に5ビットを割り当てるBaudot code⁸を符号体系として採用しました。Baudot codeは、「4. 運用計画」で説明した、時刻同期によるビットごとの統合処理に適した符号体系として採用したものです。

⁷ NTP (Network Time Protocol) は、コンピュータの時刻を正しく調整するために、ネットワーク上で時刻情報を配信しているサーバーに問い合わせる手順を定義したものです。公開されているNTPサーバーのリストは例えば、<http://support.ntp.org/bin/view/Servers/WebHome> などで閲覧できます。

⁸ Baudot codeについての詳細は、http://ja.wikipedia.org/wiki/Baudot_Code をご覧ください。

また、宇宙生成詩は、表5.2のような60秒を1つのユニットにしたプロトコルにしたがって送信されます。60秒あたりに送信できる有効な文字数は8文字であり、この8文字が詩の最小単位となります。

表5.1 430MHz帯CWビーコンによるデータ送信と信号体系

	宇宙生成詩	ハウスキーピングデータ
符号体系	5ビットBaudot code	モールス符号
符号化方式	マンチェスタ符号	モールス符号
信号速度	1 bps	6 WPM

表5.2 宇宙生成詩のプロトコル

経過時間 (秒)	内容	所要時間 (秒)
0 ~ 4	ヘッダー (シフトコード : 11011/11111) を1文字	5
5 ~ 44	Baudot code (5ビット/文字) を8文字	40
45 ~ 49	フッター (NULL : 00000) を1文字	5
50 ~ 59	搬送波なし (受信モード)	10

アマチュア無線家のみなさまには、宇宙生成詩の受信協力に加えて、これらの宇宙生成詩の仕様にもとづいたデコーダー、および受信データにタイムスタンプを付与するソフトウェアなど、共同受信に必要なソフトウェアの共同開発もお願いしたいと考えています。

6. 受信アンテナと受信が可能な期間

宇宙機からの電波を受信できる期間を見積もるため、さまざまな利得の受信アンテナに対して、宇宙機の分離から受信マージンがゼロとなるまでの時間をシミュレートしました。その結果を、図6.1に示します。図6.1は、横軸に宇宙機の分離からの時間をとっており、縦軸にはその時間にちょうど受信マージンがゼロとなるような受信アンテナの利得をとっています。つまり、この受信アンテナの利得 (要求利得) よりも、高い利得の受信アンテナを利用できれば、その時間に電波を受信することができるということです。

なお、図6.1に示したフェーズ1およびフェーズ2は、「4. 運用計画」で説明したDESPATCHのミッションフェーズです。フェーズ1では6WPM (5bps)、フェーズ2では1bps、という異なる信号速度を仮定しているため、要求利得の近似曲線は、フェーズごとに別の曲線で表されています。

図3.1と図6.1によって、ご自分のアンテナで、宇宙機の電波を何日目まで受信できるかの目安を知ることができます。例えば、20dBiのアンテナを使用して日本国内で電波を受信する場合を考えます。図6.1から、要求利得が20dBiよりも低い期間を探すと、分離から48時間がその期間に該当します。次に、図3.1を参照すると、分離から48時間が経過した時点は、日本における2回目の可視時間のおわりと、3回目の可視時間のはじめの間にあたります。したがって、20dBiの利得のアンテナでは、2回目の可視時間のおわりまで電波を受信できると予想できます。

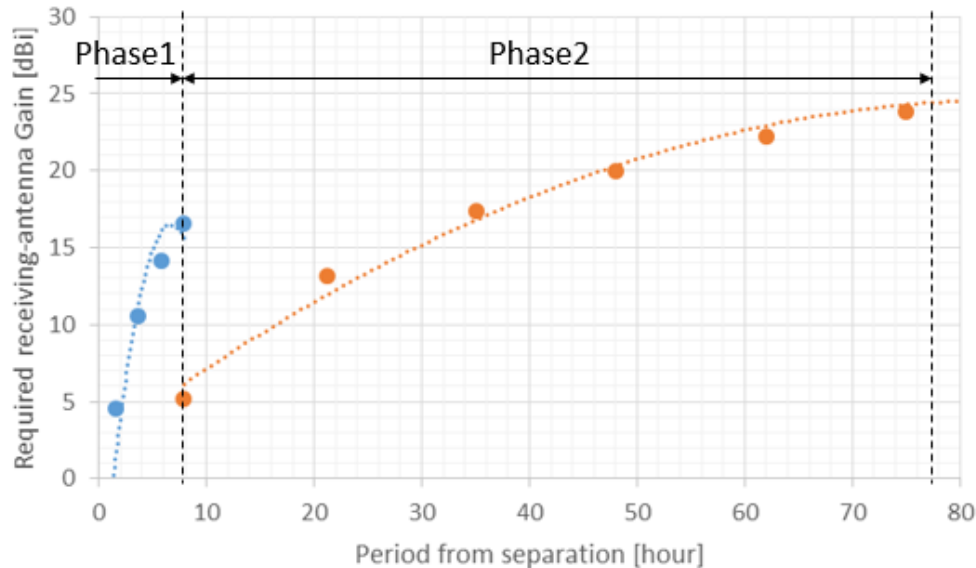


図6.1 分離からの時間と、電波の受信に必要な受信アンテナの利得の関係

おわりに

私たちは、DESPATCHのミッションである深宇宙からの微弱な信号の捕捉、宇宙生成詩の復元には、アマチュア無線家の方々の高い通信技術が必要不可欠と考えています。

また、本プロジェクトでは深宇宙からの信号を捕捉できる機会を提供します。アマチュア無線家のみなさまには、この稀有な機会を自らの技術の向上などのために有効活用していただくとともに、共同受信実験にぜひご協力いただきたいと思います。

さらに、ミッション期間中、受信のために凝らした工夫や、受信の状況を各局で共有できるような仕組みを、SNSなどを利用して提供したいと思います。本プロジェクトがJAMSATやAMSATをはじめとする、世界中のアマチュア無線コミュニティのみなさまの交遊をさらに深めることに寄与するプロジェクトとなれば幸いです。

DESPATCHの開発状況を含めたプロジェクト全体の活動については、ARTSATプロジェクトのFacebookページ (<https://www.facebook.com/artsat>) でお知らせしています。よろしければフォローをお願いします。また、本資料に関連するご意見・ご質問などございましたら、(info@artsat.jp) までお問い合わせください。