

第3章 電波を活用した生態位置検知システムの技術的検討

§ 1 検証試験の結果・評価

各検証試験結果の概要について以下に報告する。各詳細は、付録の各部会報告書を参照していただきたい。

1.1 検知システムの検証試験結果（概要）

野生動物の接近を検知し、警報を行う検知システムの検証試験においては、発信機（以下この章において「送信機」という。）に利用可能な周波数帯のうち、150MHz 帯、400MHz 帯の各周波数帯において伝搬特性検証試験を行い、併せて、その際に受信されるRSSIを受信機から対象までの距離の算定に使用することが可能か否か等の観点により検証試験を行った。

中継機は、昨年信越総合通信局が主催した「アドホックネットワークの活用における調査研究」で有効性が検証された400MHz帯センサーネットワークに使用できる機器を中継回線として使用した。

その結果、長野県軽井沢町の山間地で行われた検証試験では、受信機を見通しの良い山麓の傾斜地に設置した場合と地上高2mの位置に設置した場合を比較し、受信機の設置高2mにおいて、送信機の送信出力は1mWでも十分実用可能と考察され、近距離の野生動物の位置検知システム構築に有効であることが明らかになった。

また、周波数については、400MHz帯より150MHz帯の方が木や地形の変化の影響を受けにくい事が明らかになった。

更に、アドホックネットワークの活用により柔軟なシステムの構築や、受信機を車載としてもデータ取得ができるなど運用形態が柔軟に可変できる事が検証された。

【検知システムのモデルシステムの具体的な評価】

- (1) 送信機の周波数帯については、見通し外地域を含めた山間地での検証試験において、150MHz帯は出力1mWで距離500mまでデータが取得でき、距離による受信強度が減少する特性を得られた。400MHz帯においては、1mWで500mまでデータが取得できるものの、特に見通し外の地域では送信機位置が数十cm動いただけで受信データが変動し、安定度が低く正確なデータが得られないことが判明した。

山間地又は山岳地帯で主に生息する野生動物の接近検知においては、実用化の点では150MHz帯が適しているといえる。

- (2) 山間地で、受信機の設置高を低くすることにより、距離によるRSSI値の単調減少特性が現れたため、RSSI値による距離の判定が可能であるといえる。

あまり高い位置に設置するとハイトゲインの効果でRSSI値は大きくなるが単調減少特性が崩れ、送信機からの距離判定が不可能となる。

このことから受信機の設置に当たっては、アンテナの工夫や設置高に注意する必要がある。

受信機の高さ条件とは逆に、中継機は高い位置に設置した方が中継距離を伸ばすことができ好ましいが、構築するシステムのエリアの広さや地形などの状況を考慮の上、受信機と中継機それぞれのバランスのとれた設置条件を見つける必要がある。

また、野生動物の生態位置検知に求められる送信機の条件として、送信機から送られるデータの正確な取得があり、この条件を満たす方策として、送信機からのIDを複数回送信して受信側で複数のIDが一致した際に受信機からID信号を出力する方式により、信号伝達の正確性の向上を図った。

検証試験はID4回の繰り返しで行い、さらに検証により、要求条件を満たす距離における適切なデータ取得は、2回又は3回のIDの繰り返しで十分可能であるといえる。

(3) 中継機は、できる限り中継の伝送速度を上げるため、昨年同様、400MHz帯で40kHzの占有周波数帯幅により、最高伝送速度19.2kbpsとした。

検証の結果、中継経路が柔軟に構築でき、周波数帯及び中継機能の有効性が確認された。

1.2 高度利用システムの検証試験結果(概要)

高度利用システムの検証試験結果は概ね次のとおりである。

(1) 電波の伝搬特性の検証

利用可能な周波数帯のうち、70MHz帯、150MHz帯及び400MHz帯の3つの周波数帯を選定し、各周波数帯の送信機により電波の伝搬特性を検証した。

検証では、送信機のアンテナからの放射出力が同一の条件において、中山間地の電波遮へいを含む地形にあって、各周波数帯による伝搬の違いを確認した結果、送受信点間の距離1km程度で送信側に電波遮へいが大きい地形では、70MHz帯と150MHz帯では最大約3dBm、150MHz帯と400MHz帯では約11dBmの受信レベル差が確認され、電波遮へいが大きい地形の場合には低い周波数が有効であることが確認された。

70MHz帯は中山間地ではもっとも有効な周波数であると予測されるが、アンテナの整合が不十分であり十分な輻射電力が得られていないため、約1Km前後を境に受信データの入手が困難になった。

これについては、今後、70MHz帯のアンテナの改良等十分検討する必要があると考えられ、これらが解決するならば低い周波数は有効に利用できるものと考えられる。

また、150MHz帯では伝搬距離2km程度まで有効に受信され、その伝達範囲はおよそ12km²であった。

なお、400MHz帯については、一部の地形(送信点側近傍に大きな遮へいのある地形)において不感があったことから、150MHz帯と比較して有効伝達範囲が狭くなることが確認された。

(2) データの正確性

高度利用システムは、その特徴としてGPSによる位置データを活用し送信機の位置を特定するものであるため、送信機の電波に重畳されたGPS位置データが専用受信機により正確に入手できるかの検証を実施した結果、ほぼ正確な位置情報の入手が可能であった。

【高度利用システムのモデルシステムの具体的な評価】

高度利用システムについては、そのシステム構成上送信機の電波の到達範囲に受信機が存在することが必要となるため、送信機の電波の到達範囲が広いことが必須の条件となる。今回の検証では概ね150MHz帯の電波にあつては半径2km程度の伝搬が得られ、その面的範囲はおよそ12km²余に及んだ。

作業部会では、生態の観察範囲は概ね10km²程度の範囲との提言があることから、本検証用システムは十分な性能であると評価できる。

また、検証では、一定区間での電界強度測定により、その輻射電力を測定した結果、70MHz帯及び150MHz帯は送信機とアンテナの十分な整合が得られず、特定小電力無線局の規格である10mWに相当する輻射電力を得るため、受信機側において不足する受信電界の補正を行った。

この結果、10mW相当の電力でも十分な伝達範囲が確保できることが確認された。今後、受信機感度の向上等の対策を講じることにより、更なる利用範囲の拡大が可能であると評価できるものである。

1.3 各モデルシステムの課題

(1) 検知システム

検知システムでは、以下の点が課題として上げられる。

技術的課題

- ・小動物にも対応するためには、送信機の構造の更なる小型化が必要である。
- ・アンテナの短縮化等の改良が必要であり、短縮コイルにより対処する必要がある。
- ・水平偏波に対応する受信アンテナや受信偏波ダイバーシティの導入検討が必要であり、技術的には可能であるものである。
- ・中継機の中継距離を伸ばすための工夫が必要である。
- ・中継機装置及び受信機を長期間使用するために太陽電池の電源利用を検討すべきである。

機器設置における課題

- ・受信アンテナの設置方法に工夫が必要である。
- ・中継機の中継距離が延長できる設置方法の検討が必要である。

機能その他の課題

- ・複数の送信機の送信タイミングが重ならない工夫が必要である。
- ・送信周期は生態の移動速度、中継周期、必要な期間等からの検討が必要である。
- ・より安定的にRSSIからの推測距離を得るためには、取得データの移動平均等の処理の検討が必要であり、ソフトウェアにより対処する必要がある。

(2) 高度利用システム

高度利用システムでは以下の点が課題として上げられる。

送信機について

- ・小型化、低消費電力化、アンテナ形状を含む改良が必要である。
- ・GPS受信機の位置、耐衝撃、耐水構造等の改善が必要である。
- ・双方向通信による制御の検討、システム構造の簡易化が必要である。
- ・検知システムとのデータ伝送速度の整合性の検討が必要である。
- ・マルチパス等によるデータエラーの補償方法の検討が必要である。

受信機について

- ・受信感度の向上(20～30dB)が必要である。
- ・RSSI値の表示機能、音声モニター機能の付加、受信データの蓄積機能がそれぞれ必要である。
- ・双方向通信による制御の必要性の検討を要する。
- ・システム構造の簡易化が必要である。

システム全体について

- ・エリアの広域化に対応する分散受信方式の検討が必要である。
- ・検知システムとの整合性の検討が必要である。

1.4 評価のまとめ

- (1) 検知システムのモデルシステムでは、送信機の送信出力1mW、6秒間隔で10bitのIDを2回及び前置信号並びに付加情報合計約100bitを送信した場合、単3型2400mA/hのリチウム電池で2年間以上運用することが計算上可能である。

また、その大きさ、重量からクマ・シカへの装着が可能であり、今後、ケースやアンテナ等の改良により、サル・イノシシなどにも十分実用化が図れるものと評価できる。

高度利用システムでは、送信機の送信出力10mW時において、運用可能時間は、送信時間を短くし、休止時間を長くする。GPSは対象動物の移動距離が少ない場合、数時間に一度の測定とする。通常は間欠受信モードとし、送信要求があった場合GP

SデータやIDを送出するなどの工夫により1日6回の計測で1年間運用することが計算上可能である。

また、高度利用システムはクマ等大型の個体への装着は可能であり、今後一層の小
型化が求められるが、生態把握の要求にあたり同じく実用化が図れるものと評価できる。

(2) 山間地を主なエリアとする生態位置検知システムに使用する周波数帯は、検知システム及び高度利用システムの検証試験結果から、現状ではアンテナ等に若干の工夫を要するものの70MHz帯及び150MHz帯が最も望ましい。

(3) 今後の各課題については技術的にはおおむねクリアできるものであり、実用化にあたっては、目的や用途、予算等に応じて対応することが望まれる。

§ 2 基本システムの技術的条件の提案

§ 1の検証試験の結果を踏まえ、実用化に向けて、以下に基本的なシステムの技術的条件を提案する。

なお、提案の技術的条件は、現段階において諸条件を考慮したものであり、今後システムの実用化にあたり、技術開発動向やシステム構成、諸条件によって変更もありうることを申し添える。

1.1 送信機の技術的条件

(1) 周波数等

利用可能周波数帯

周波数については、V・UHF帯及びSHF帯が想定され、概ね50MHzから2,400MHzぐらいまでがアンテナの大きさや伝搬特性から候補として考えられる。一般的に生態に装着する送信機は、要求される条件からすればより小さな送信出力を有効に活用できる周波数が必要であると考えられ、このため周波数は空間の伝搬損失が少なく、また、利用環境となる中山間地域において見通し外の伝搬が得やすい周波数が望まれる。

このことから500MHz以上の周波数は空間の伝搬損失が大きく、電波の遮へい回折が得にくいいため、本調査検討会では検証の対象から除外し、それ以下の周波数において選定を行った。

この中で、本検討会の中で明らかとなった利用環境等を考慮し、利用可能と判断された70MHz帯、150MHz帯及び400MHz帯について検証を実施した結果、生態に装着する送信機の周波数は、70MHz帯、150MHz帯が利用環境において求められる有効な周波数帯として推奨できる。

特に、150MHz帯は検証の結果、樹木や地形の変化による影響が少なく使用には最も適していると認められる。

また、今後の送信機の製作に当たっても、150MHz帯、400MHz帯は、無線機器の

市場性が高く汎用部品の流通も多いため、部品の流用も容易である他、安価な製品の開発が期待できるものとする。

周波数の数

ア 1局が発信する送信時間

検知システムでは、ID 10bit、1 発信中 2 回送出に設定すると、前置信号や付加情報とともにデータ長は 98bit となり、これを 1200bps で送信すると 1 回の送信時間は約 0.0817 秒である。

高度利用システムは、GPS 情報と前置信号や付加情報で 300bit 程度であり、これを 2400bps で送信すると 0.12 秒程度であるが、送信周波数が PLL 方式であり、この周波数ロックまで 300ms の時間を必要とするため、全体で 0.42 秒となっている。

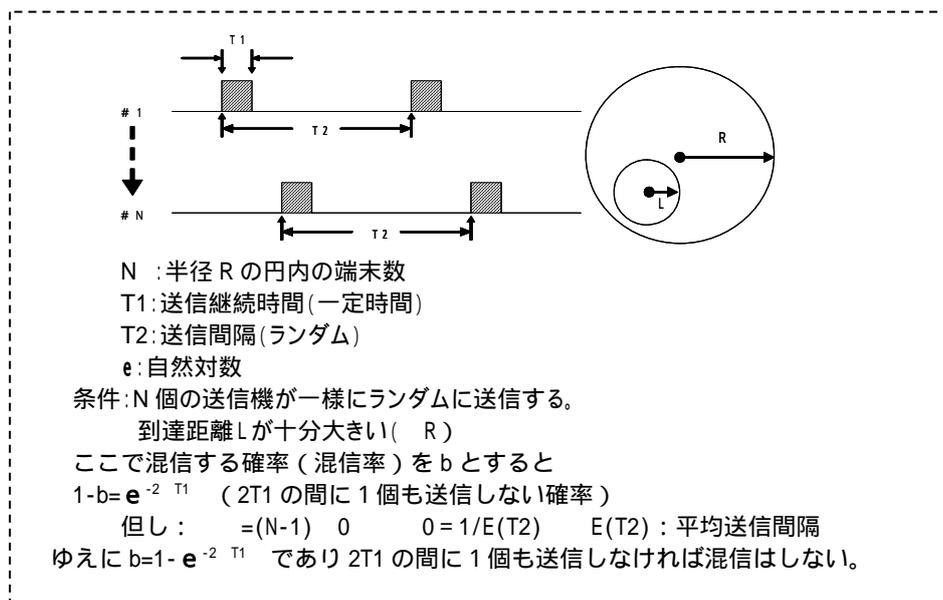
イ 単位地域でランダムの間欠送信をした場合の混信確率

検討会での要求条件の整理結果からは、検知システムでは電池容量を優先した上でできる限り送信間隔が短いことが求められており、検証では、4 秒に 1 回の送信間隔で試験を行った。

前述のように、検知システムでは、恒常的に接近情報の取得が必要なことから、送信機の送信間隔は小さくなるため、送信回数は比例して多くなる。

有効伝達範囲とされる半径 500m の範囲において、同じ仕様の送信機が利用可能と判断される最大送信機数は、送信機の送信タイミングをずらすことが必要であり、検知システムの場合、4 秒に 1 回送信することとすると、送信時間は約 0.08 秒であるため 0.1 秒きざみで、送信から送信までの時間に単純に 39 台の送信機を挿入することが可能と考えられる。

しかし、送信間隔が一応でないランダムな送信間隔を取り入れた場合では、その混信発生は確率として、次により求められる。



ここ

で、Nの数を变化させた場合の混信確率は

$$N=3 \cdot 5 \cdot 10, E(T1)=0.0817\text{sec}, E(T2)=4\text{sec} \text{ とすると、 } 0=(0.1)/4=0.025 \\ =2 \times 0.025 \cdot 4 \times 0.025 \cdot 9 \times 0.025$$

このときのbはN=3の時 7.8パーセント、N=5の時 15.0パーセント、N=10の時 30.8パーセントとなり、順次混信発生確率が上昇する。

単位地域(半径 500m)内に検知される局数は同一時間において最大でも 10 台程度と想定され、この時の混信確率は 30.8 パーセントである。

これは、1回目に混信しても、3回のうちには、ほぼデータ取得ができる確率であり、クマ、サル等野生動物の移動時間を勘案して接近検知の要求は満たされるので、混信を許容して同一周波数による共用が可能であるといえる。

1秒に1回の送信間隔では、2年間の電池寿命を実現するためには約 13 Ah の電池を必要とするので、その重量から対象は野生動物ではクマ以外には装着は困難であり、単位地域において同一時間に最大でも3頭以下と推測されるので、送信機数 3 台では 27.9 パーセントの確率で混信が発生するが、上記同様に、同一周波数による共用は可能であると言える。

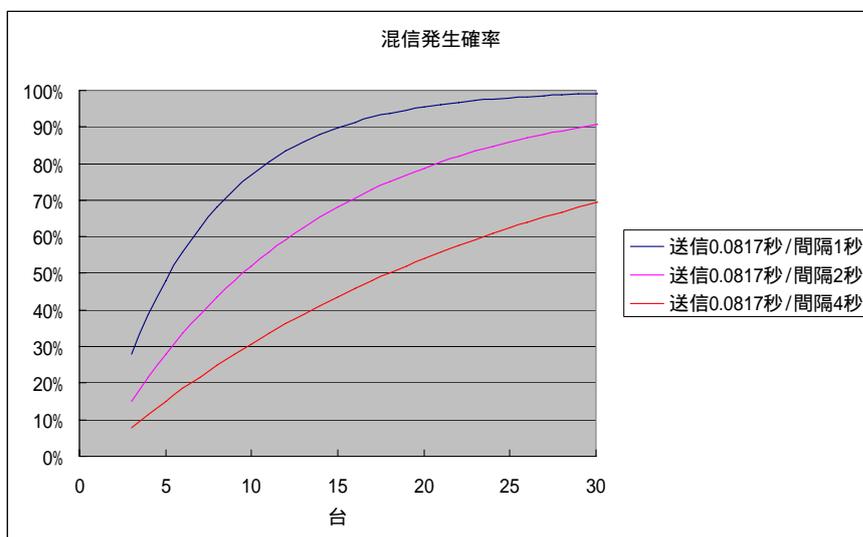
しかしながら、今後の需要増を考慮すると送信間隔には一定の基準が必要と思量され、送信時間に比例して送信間隔を空けることが必要である。

単位地域内に 10 台収容し、混信確率 50 パーセント程度を上限と考えると送信間隔は送信時間のおおむね 20 倍以上とすることが妥当である。

この送信時間と送信間隔の比は、単位時間内のキャリアの最大ONタイムと最小OFFタイムの比で規定することが適当である。

また、送信は、一定間隔より基本秒に素数秒を加えたものを間隔とすることや、同一周期の送信機同士の混信回避のために基本秒にランダム秒を加えたものを間隔とすることが混信回避のために有効と考えられる。

送信時間 0.0817 秒、送信間隔 1・2・4 秒時の混信発生確率は下図のとおり。



一方、高度利用システムでは、位置把握の要求条件は1日に数回でも確実に対象の位置の把握ができれば要求条件を満たすものである。

データ取得量は、電池寿命等から日量6回程度と考えられることから、単純に動物の活動する時間帯を12時間程度と仮定して2時間に1回の送信となる。

このため、単位地域(半径 2km)内での混信発生確率は、送信時間 1 秒で 200 台の送信機が稼動しても約 5.4 パーセントと問題ない数値である。

ウ 必要な周波数の数

上記のことから、混信に対する安全性の考慮や、対象とする生態が多種にわたり、同時に複数の異なる生態を探索する必要も発生することが想定される。

さらに、同様の無線通信形態が想定される山岳遭難時の救助用や狩猟時の猟犬の位置把握などへの応用(第 4 章参照)も考慮すれば、周波数2波以上が必要と判断される。

(2) 送信時間制限

上記(1)のように、周波数を共用するためには、連続送信をしないことは必須の条件であるとともに、送信時間や送信間隔は目的や送信時間、電池寿命に応じて設定することが必要である。

最大送信時間は、送信間隔・電池寿命等の要求条件から算出すると、高度利用システムでデータの繰り返しを最高 4 回程度とすれば 0.78 秒程度であり、今後、データエラーの発生率を低減するため、当該伝送速度を 1/2 程度に低下させても、1.23 秒程度である。

将来は、時間経過に伴う位置情報の蓄積データや、野生動物の体温、心拍数等のデータの付加が検討会で要望されており、そうした要求に応えることや電池寿命等を勘案すると、上記のほかに 4kbit 程度の情報が送れる、最大 5 秒の送信時間が必要十分であり、1 回の送信時間の上限とすることが必要である。

キャリアセンスについては、上記送信時間及び送信間隔の制限により混信は容認できるものと思料されるので特に付加を必要としない。

(3) 空中線電力

検証試験により、10mW 以下で必要な通信エリアはカバーできることが検証された。電池寿命を優先する利用形態や、機器の製造コストや普及も併せて考慮すると、生態位置検知に使用するものは 10mW 以下が最も適しているといえる。

なお、電池寿命を優先しないもの、より広い通信範囲を必要とする場合は 10mW を超えるものも考えられるが、それらは、別の制度として整理すべきである。

(4) その他技術基準

占有周波数帯幅については、必要な情報の量や利用の形態から、MSK 変調又は GMSK 変調で送信速度は各々2400bps 以下で十分と思料されるので、150MHz 帯にあっては 16kHz が適当である。

周波数偏差、不要電波の強度、隣接チャンネル漏洩電力、空中線利得等については、特定小電力無線局に準ずる技術基準で要求条件を十分満たすことから、特定小電力無線局に準ずる技術基準が適当である。

また、モデルシステムは当該技術基準を満たしており、技術的にも製造は可能である。

(5) ID

個別識別を行うため、また、広域性を確保するために、送信時に番号によるIDを付加することが必要である。その番号はメーカー、公益団体、自治体等により付与の管理と体系の統一性を図ることが望まれる。

(6) 送信機の測定方法

特定小電力機器の測定に係る電波法関係告示の基準を準用する。

1.2 受信機の技術的条件

受信機は、内部雑音が小さく、感度及び了解度が十分であることが必要である。また、空中線(アンテナ)の工夫や低雑音受信アンプの付加等により、できる限り受信感度を向上させることが望ましい。

また、受信機が副次的に発する電波等の限度は、一般的な受信設備の基準に準じて、4nW(ナノワット)とすることが適当である。

【提案する技術基準の一覧】

	用途	データ伝送用
送信機	周波数帯	150MHz 帯
	周波数の数	2 波以上
	通信方式	単行通信又は単信方式
	空中線電力	10mW 以下
	電波型式	F2D
	占有周波数帯幅の許容値	16kHz
	周波数の許容偏差	4×10^{-6} ()
	不要電波の強度の許容値 (スプリアス発射等)	2.5 μ W 以下 ()
	隣接チャンネル漏えい電力比	40dB 以上 ()

	発振方式	水晶発振又は水晶発振により制御する 周波数シンセサイザ方式
	キャリアセンス	不要
	送信時間制限	最高 5 秒、送信間隔は送信時間の 20 倍
	空中線の構造	給電線及び設置装置を有しないものであ ること ()
	空中線利得	2.14dbi 以下 ()
	その他	一の筐体に収められており、かつ、空中線 端子を備えず、容易に開けることができな いこと ()
受信機	副次的に発する電波等の限度	4 nW 以下 ()

特定小電力無線局の基準に準じるもの

1.3 中継機の技術的条件

中継機は、データの中継の確実さが求められ、昨年信越総合通信局が行った「アドホックネットワークの活用における調査研究」で報告されたセンサーネットワークのものが応用できる。

ただし、現行制度下での 429MHz 特定小電力無線局を使用する場合は、周波数帯域の制限もあり、通信速度が遅い(2.4～4.8kbps)という弱点がある。

中継時にはできる限り高速であることが望ましく、また、一般への普及促進を容易にするため、免許を要しない 400MHz 帯特定小電力無線局としての広帯域のアドホックネットワークの実用化が必要である。

§ 3 電波法体系上の位置づけと考察

検知システムで検証試験に使用した送信機、中継機並びに高度利用システムで検証試験に使用した送信機は、使用周波数の関係から調査検討にあたっては電波法に基づき実験局としてそれぞれ免許を取得しているものである。

今後の実用化にあっては、送信機について、より普及しやすくするために、本件と同様に位置把握を行うデータ伝送を行うもので、間欠送信であって 10 mW 以下の送信電力で足りるものは、免許の不要な特定小電力無線局とすることが望ましい。

なお、400MHz 帯については、既に特定小電力無線局として制度化されており、データ伝送用に使用できる周波数が用意されている。本調査検討会により検証を行い山間地域において有効とされた 150MHz 帯についても、400MHz 帯同様の制度化が必要である。

また、生態位置検知のデータ伝送に使用するものであっても、10 mW を超えるものなど、特定小電力無線局制度の要件を満たさない利用条件の場合には、別途、無線局の免許

を受けて利用する必要がある。

この場合、通信の形態、通信内容から、位置検知に利用するものは簡易な業務であると整理できるので、使用形態により既存の簡易無線局のシステムで対応が可能であると考えられる。

また、今後、多様化するニーズを踏まえ、必要に応じシステムの技術的条件の検討を行っていくことが望ましい。

なお、稀少動物や、長期間にわたる学術研究など多量のデータが必要とされるものなど、上記の条件を逸脱するものについては、実験局として無線局の免許を受けることが可能であると考えられるが、この場合の周波数等については、事前に関係官署と十分な調整を行うことが必要である。

§ 4 その他の課題

送信機(ケース)の材質、形状等については、第一に、より一層の小型化が望まれる。また、固定部分が直接野生動物の体に触れないよう、ベルトの外側に装着し、接触部分で痛みがないよう角の立たない柔らかで、丸みのある構造であることが望ましい。でき得れば、気道を確保できるカーブを採用するなどの工夫が望まれる。

野生動物の激しい動きや、温度変化等の厳しい環境条件下で使用することを勘案して、樹脂等で完全に包埋してある構造が望ましく、完全防水性能も必要である。

更に、振動等の耐久性向上のため、無線モジュールもシリコン等で封入しておくことが望まれる。

送信機の重量は、経験的に体重の5%以下を目安に考えられてきたが、動物の負担を軽減するために、可能な限り軽くすることが求められる。したがって、送信機の製作に当たっては、「軽量化の追及」と「堅牢性の確保」のバランスが必要となる。

イノシシなどは、その体型に応じて、ランドセル型やイヤー(耳)タグ型にするなどの工夫も必要である。

首輪の材質、形状等について、首輪は、動物の皮膚を刺激しないように、柔らかい化学繊維の幅広ベルトが望ましい。

送信機を首輪に固定する位置は動物の腹側とし、イノシシ等でランドセル型のベルトで装着する場合は背側とする。

動物愛護の観点から、首輪等は一定期間で腐敗等により脱落するような工夫も必要で、環境省も送信機の装着を伴う調査にあたって、こうした点に配慮するよう求めている。

空中線(アンテナ)の形状や長さについては、サルは手が使えるため、装着直後はアンテナを掴んで引っ張り、場合によってはもぎ取ってしまうことがある。

そこで、アンテナは短縮コイル等の活用によりできる限り短く、又は、破損しないよう、全部又は半分を首輪の中に埋め込むような構造が望ましい。

半部分が首輪に埋め込まれた構造であれば、外部に露出している部分が失われても、埋めている部分から電波が出て使用が継続できる。

また、アンテナが外部に出る場合は首後方等にセッティングするのが望ましい。