

核兵器を無力化して平和を守る宇宙技術の応用システム

市吉 修

2017-9-6,26

まえがき

核兵器はその運搬手段が無効化されれば兵器としての意味を失う。そこで何時でも何処でも発射されたミサイルを検知、追尾、捕獲、発射元に返す方法を提案する。先ず二個以上の衛星で警戒区域を常時観測しミサイルの発射を即時検知する。ミサイルは噴出ガスが高温であるから赤外線カメラで衛星から取った画像でその位置が地表に投影された形で把握される。二個の異なる方向からの衛星画像によって二直線の交点としてその位置が特定できる。

ミサイルの高度が上がると日本国内から遠距離レーダで追尾する。約 2,000km の彼方から大きさ数メートルの飛翔体を検知、追尾するには送信電力と共に受信装置の利得を十分上げなくてはならないが、単にアンテナ利得を上げると指向性が鋭くなって追尾の地理的範囲が狭くなる。ここではこの二律背反問題を複数受信装置の出力信号を同相合成する事で解決する。

観測されたミサイルの高度、速度から一般の航空機でない事を確認したらお迎えミサイルを発射する。ここでは一般の迎撃ミサイルのように目標ミサイルを打ち落とすのではなく目標ミサイルに背後から追いつき、捕獲する方法を提案する。捕獲法は迎撃法より命中精度が上げられるばかりでなく当ミサイルを発射元に返す事も可能であると思う。もしそれが実現すれば核兵器は軍事的には無意味になり人類は核兵器の脅威から解放されるであろう。

1. 二衛星による飛翔体の瞬時位置検出

此処で提案する方法は二個の衛星から取った写真を重ねてミサイルの位置を特定する方法である。

飛翔体の座標を $\mathbf{r} = (x, y, z)$

衛星 A の位置を $\mathbf{r}_a = (x_a, y_a, z_a)$,

その衛星画像で飛翔体が写っている地表の点 A' の座標を $\mathbf{R}_a = (X_a, Y_a, Z_a)$

とし両者をむすぶ vector を $\mathbf{a} = \mathbf{r}_a - \mathbf{R}_a$

とする。

衛星 B, についても同様に $\mathbf{r}_b, \mathbf{R}_b, \mathbf{b}$, を定義する。

すると飛翔体は次の二直線

$$\text{直線 AA'} ; \quad \mathbf{r}_a + t \cdot \mathbf{a} \quad (0 < t < 1)$$

$$\text{直線 BB'} ; \quad \mathbf{r}_b + u \cdot \mathbf{b} \quad (0 < u < 1)$$

の交点として求められる。

$$\mathbf{r}_a + t \cdot \mathbf{a} = \mathbf{r}_b + u \cdot \mathbf{b}$$

これを解いて

$$t\mathbf{a} = (\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a) \cdot \{(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{b}\} / \{(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}) \cdot (\mathbf{b} \cdot \mathbf{b})\}$$

$$u\mathbf{b} = (\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) \cdot \{(\mathbf{b} \times \mathbf{a}) \times \mathbf{a}\} / \{(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}) \cdot (\mathbf{b} \cdot \mathbf{b})\}$$

但し $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ は vector の内積、 $\mathbf{b} \times \mathbf{a}$ は外積である。

これらを上の t, u に代入すると

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_a + t\mathbf{a} = \mathbf{r}_b + u\mathbf{b}$$

として飛翔体の位置を決定できる。

上記衛星は高速衛星通信回線により常時画像データを地球局に送信する。そのデータはミサイル防衛システムに送られ上の方法でミサイルの位置が算出される。画像撮影とミサイルの位置測定は頻繁に例えば秒単位で実行できるであろう。

ミサイルの高度が航空機の成層圏飛行より十分高く、例えば 30km を越えればミサイルと判断し防衛システムを起動する。

2. 地上レーダーによるミサイル位置検出

攻撃ミサイルの高度が十分大きくなると地上のレーダシステムでその位置と速度の測定が可能になる。例えば 1500km 遠方からミサイルの位置と速度を検知できるレーダシステムの設計例を以下に示す。

[1] 性能

- 測定可能なミサイル速度をマッハ 6、即ち約 2,000 (m/s)とする。
- 測定可能な距離範囲は通常 1 5 0 0 k m、最大その倍とする。

[2] レーダー方式

送受分離のパルス圧縮方式とする。その利点はパルス圧縮技術により送信信号を一定時間の持続波とする事ができ、そのピーク電力を抑えられる事である。

パルス圧縮のための信号としてはPN信号を用いる事とする。その利点の一つは複数のレーダー局で符号分割方式により同一周波数の共同使用が可能なる事である。地理的に十分離れた三局のレーダー測定により対象ミサイルの三次元位置を決定する事ができる。

またPN符号の検出は信号の周波数誤差が十分小さくないと正しく相関検出が行われないのでここでは10Hz間隔の並列周波数変換とPN相関検出を同時に行う。それにより対象物体までの距離とその視線速度を同時に検出する。

[3] 使用周波数帯

ここで検討するレーダーは極めて遠方からの対象の把握を目的とするので途中に長大な降雨地域があっても降雨減衰の少ない周波数でなくてはならない。また対象となる攻撃ミサイルの大きさは概ね数mと考えられる。これを半径aの完全導体球で近似すると対象物のレーダ断面積を確保するには使用電波の波長λはaよりも小さいことが望ましい。

対象とする攻撃ミサイルの大きさとしてはa = 2 ~ 10 m程度であろう。そこで使用電波としてはそれよりも少し短い波長λ = 1 (m) の電波を使うものと想定する。

[4] レーダー回線設計

送信アンテナ入力端の電力P_t、送信アンテナ利得G_t、対象物までの距離をd、対象物のレーダ断面積をσ、受信アンテナの実効面積をA_rとすると受信アンテナの出力において得られる信号電力P_rは次式で現される。

$$P_r = P_t \cdot G_t / (4\pi \cdot d^2) \cdot \sigma / (4\pi \cdot d^2) \cdot A_r$$

具体的な数値を下表に示す。

表1 提案レーダー システム諸元

仕様	測定距離 d (km)	1500
	飛翔体の速度(マッハ)	6
送信装置	送信電力 P _t (dBW)	40
	送信アンテナ利得 G _t (dBi)	20
往路	距離(d) (km)	(1500)
	往路損失(1/(4π・d ²)) (dB/m ²)	-134.5
ミサイル	レーダ断面積 σ (m ²)	10
復路	距離(d) (km)	(1500)
	復路損失(1/(4π・d ²)) (dB/m ²)	-134.5
受信アンテナ	受信アンテナ断面積 A _r (dBm ²)	20
	受信アンテナ出力電力 P _r (dBW)	-179
雑音	受信システム雑音温度(dBK)	20
	ボルツマン定数(k=1.33x10 ⁻²³) (dB)	-228.6
	雑音電力密度 N _o (dBW/Hz)	-208.6
通信容量	C/N _o (dB/Hz)	29.6

[5] 送信アンテナ

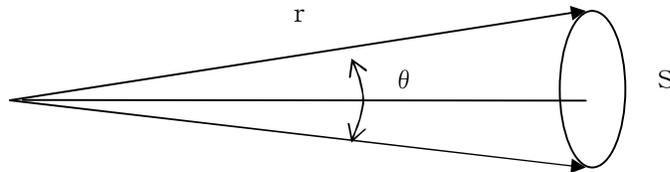
利得Gと指向性Ω (立体角) の間には次の関係がある。

$$\Omega = 4\pi / G$$

今G=100 (20 dBi) の時にはΩ=0.04πとなる。

他方立体角Ωと視角θの間には次の関係がある。

$$\Omega = \pi / 4 \cdot \theta^2$$



これより

$$\theta = 0.4 \text{ (rad)} \text{ (アンテナ利得 } G = 20\text{dBi)}$$

距離 r=1500 (km) に対する探索範囲は直径 600(km)となる。

これで不足な場合には上記θだけ方向をずらした複数の送信アンテナを用いればよい。

アンテナ利得G=20 (dBi) のアンテナの実行面積A_eは

$$A_e = (\lambda^2 / 4\pi) \cdot G = 7.96 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

[6] 受信アンテナ

上記回線設定の受信アンテナ断面積 100m² (20dBm²)を一個のアンテナで実現する事は物理的に極めて困難である。仮に一個の開口面アンテナで実現したとするとその利得は

$$G = (4\pi/\lambda^2) \cdot A_r = 400\pi = 31.0 \text{ (dBi)}$$

指向性は $\Omega = 4\pi/G = 0.01$,

視角は $\theta = 2\sqrt{(\Omega/\pi)} = 0.113 \text{ (rad)}$

これは1500km彼方では約170kmに相当する。これではあまりに狭すぎるのでそのようなアンテナを複数個用いる事が必要になる。それでは装置があまりにも大規模になり実現困難であろう。

[7] 受信装置

ここで次の課題とその解決法を以下に示す。

課題 アンテナの方向感度を広いままに保ちながら受信機の利得を上げるにはどうすれば良いか。

解決法 アンテナを含めた受信装置を複数設置し、それらの出力信号を同相加算する。

ここでは送信アンテナと同様のアンテナを受信アンテナに用いる事とする。前述のようにアンテナの実効面積を A_e とすると必要な実効面積 A_r を確保するために必要な受信装置の数は

$$A_r/A_e = 100/7.96 = 12.6$$

故に13基の受信装置を設置してその出力信号を同相合成して出力する。

これら13通りの受信装置の遅延時間特性を波長に比べて十分正確に揃える事が必要である。此处で用いる電波の波長は $\lambda = 1\text{m}$ であるから回路長の誤差を 1.0cm とするとこれらの受信装置間の信号位相差は 3.6 度となり、信号エネルギー損失は十分小さい。

各受信装置の出力信号は基底帯域(周波数0Hz帯)の複素信号に周波数返還されシステムクロックで標本化、A/D変換される。同相合成を含め以降の信号処理はDSP処理される。

異なる方向からの到来波に対して上述の同相加算を行うには各受信装置の出力信号に応じて定まる位相補償係数を乗ずる必要がある。同相合成による利得の向上は本質的に指向性の向上、即ちアンテナの感度方向が狭まる事を意味する。高い指向性と広い方向感度を実現するには複数の想定方向に対応した同相加算処理ルーチンを設ければよい。

[8] パルス圧縮システム

パルス幅

レーダー波のパルス時間幅を Δt とするとそれは測定空間精度 $c \cdot \Delta t$ に相当する。ここで c は光速である。 $c = 3 \times 10^8 \text{ (m)}$ と巨大であるから測定精度を上げるには Δt をできるだけ小さくしなくてはならない。ところが Δt に逆比例してRF波の所要周波数帯域幅が増大するので自ずと限界がある。

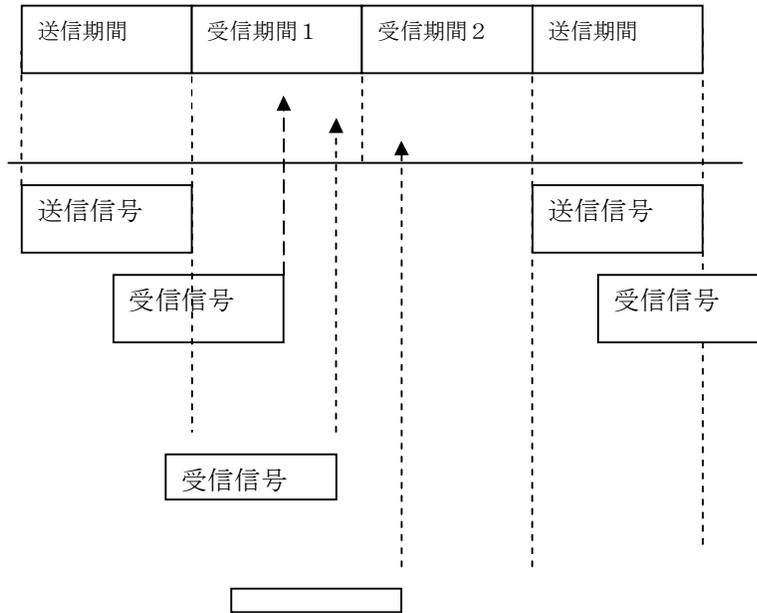
ここでは次の方式を採用する。

- <> パルス幅 $\Delta t = 1.2 \mu\text{s}$
- <> 周波数拡散符号 PN符号
- <> PN符号
 - 符号長 2^{13}
 - 符号周期 10ms
 - チップ速度 819.2kc/s
 - 変調方式 直接拡散(BPSK変調)
- <> PN符号相関検出回路
 - パルス復号法 PN符号相関検出

- 周波数分析; 上のパルス検出を10Hzステップの周波数帯毎に並列に実施。ドップラー周波数偏移を同時に測定する。

<>レーダー時間フレーム

下図に示すように各10msの送信、受信1、受信2の3期間構成とする。受信期間1に検出されるのは対象までの距離が0から1500km, 受信期間2には1500kmから3000km遠方の物体からの反射波の検出パルスが表示される。



<>PN符号処理

送信PN符号

送信パルスタイミングを $t = 0$ とすると送信PN信号は

$$P(t) = P(0) \cdot g(t) + P(1) \cdot g(t+T) + P(2) \cdot g(t+2T) + \dots + P(M-1) \cdot g(t+(M-1)T) \\ = \sum_{m=0, M-1} P(m) \cdot g(t+m \cdot T)$$

$\{P(m)=1, \text{ or } -1 ; m=0, 1, 2, \dots, M-1\}$ はPN符号であり、変調波形 $g(t)$ は

$$g(t) = 1 \quad (-T/2 < t < T/2) \quad (T \text{ は矩形パルスの持続時間})$$

$$= 0 \text{ (それ以外)}$$

受信PN信号

受信信号は送信信号が減衰される他に対象物の速度によるドップラー周波数偏移 ω_d を受ける。

$$Q(t) = e^{(j\omega_d \cdot t)} \cdot P(t - 2d/c)$$

受信PN相関検出

$$Q'(t) = P(0) \cdot Q(t) + P(1)Q(t-T) + P(2)Q(t-2T) + \dots + P(M-1)Q(t-(M-1)T) \\ = \sum_{m=0, M-1} P(m) \cdot Q(t - m \cdot T) \\ = \sum_{m, m'=0, M-1} P(m) \cdot P(m') \cdot e^{(j\omega_d \cdot (t - m' \cdot T))} \cdot g(t + (m-m') \cdot T - 2d/c) \\ = e^{(j\omega_d \cdot t)} \sum_{m, m'=0, L-1} P(m) \cdot P(m') \cdot e^{(-j\omega_d \cdot m' \cdot T)} g(t + (m-m') \cdot T - 2d/c)$$

これはPN符号の性質から $m=m'$ の時最大相関値をとり、

$$Q'(t) = e^{(j\omega d \cdot t)} \cdot g(t - 2d/c) \cdot [m=0, M-1] \sum e^{(j\omega d \cdot m \cdot T)}$$

$$= e^{(j\omega d \cdot (t-(M-1)T/2))} \cdot \sin(\omega d \cdot T \cdot M / 2) / \sin(\omega d \cdot T / 2) \cdot g(t - 2d/c)$$

これを送信信号 $P(t)$ と比較する事により $g(t - 2d/c)$ より対象物との距離 d が得られる。

ドップラー周波数偏移

RF周波数 $f_r = 300\text{MHz}$, 対象物の速度 $v = 2000\text{m/s}$ の場合最大ドップラー周波数偏移は $f_d = f_r \cdot v / c = 2000\text{ (Hz)}$ となる。

PN相関検出器の振幅は

$$\sin(\omega d \cdot T \cdot M / 2) / \sin(\omega d \cdot T / 2) = \sin(\pi f_d \cdot T \cdot M) / \sin(\pi f_d \cdot T)$$

これは $|\pi f_d \cdot T \cdot M| \ll 1$ なる条件が満たされなくては確実に利得 M 倍が得られない。

$TM = 10\text{ms}$, f_d が最大 2kHz であるから f_d が 100 (Hz) よりも大きくなれば

$|\pi f_d \cdot T \cdot M| \ll 1$ なる条件は満足されない。

周波数分析型PN相関検出回路

$|\pi f_d \cdot T \cdot M| \ll 1$ なる条件を満たすために $\Delta f = 10\text{Hz}$ 単位の周波数変換とPN相関検出を行う。具体的には周波数変換 $k \cdot \Delta f \rightarrow 0\text{ (Hz)}$ への周波数変換とPN相関検出を行うと

$$R[k](t) = [m=0, M-1] \sum P(m) \cdot e^{(-j 2\pi \cdot k \cdot \Delta f \cdot m \cdot T)} \cdot Q(t - m \cdot T) \quad (k=1, 2, 3, \dots)$$

出力 $R[k](t)$ は周波数分析と時間分析の二次元データとして得られる。

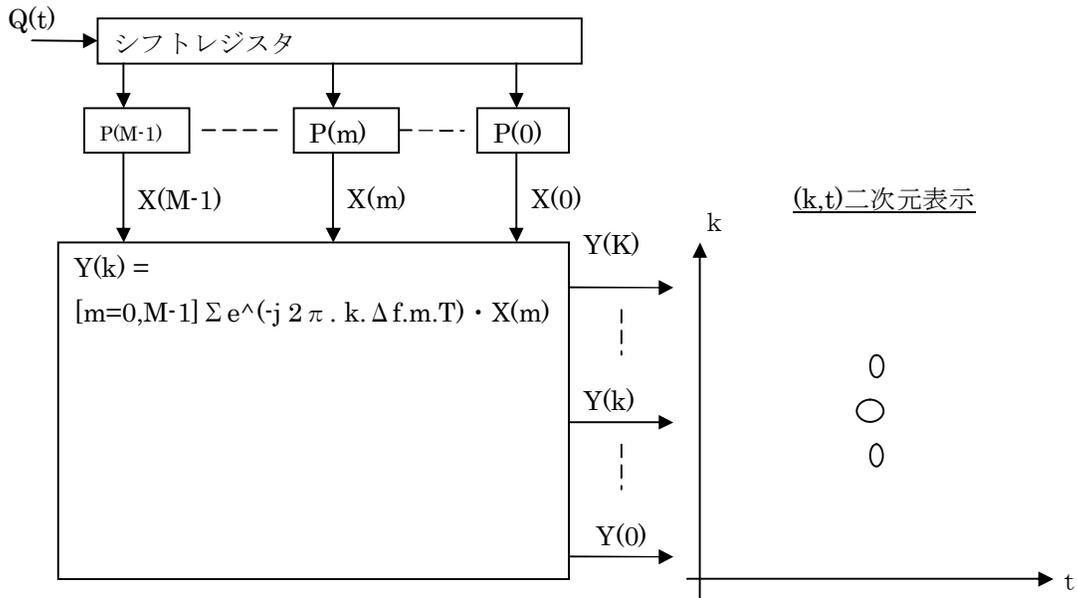
ドップラー周波数偏移は最大 2kHz であるから k は高々 200 通りを行えば良い。

ドップラー周波数偏移を $\Delta f = 10\text{Hz}$ 単位で測定すると対象物体の速度は精度

$$v = c \cdot f_d / f_r = 3 \times 10^8 \times 10 / 300\text{M(Hz)} = 10\text{ (m/s)}$$

で測定できる。周波数分析型PN相関検出回路の構成と出力の様子を下図に示す。

受信信号



周波数分析型PN符号相関検出回路

<> パルス測定回路のS/N

前述の回線設計により信号伝送容量は

$$C/N_o = 29.6(\text{dB/Hz})$$

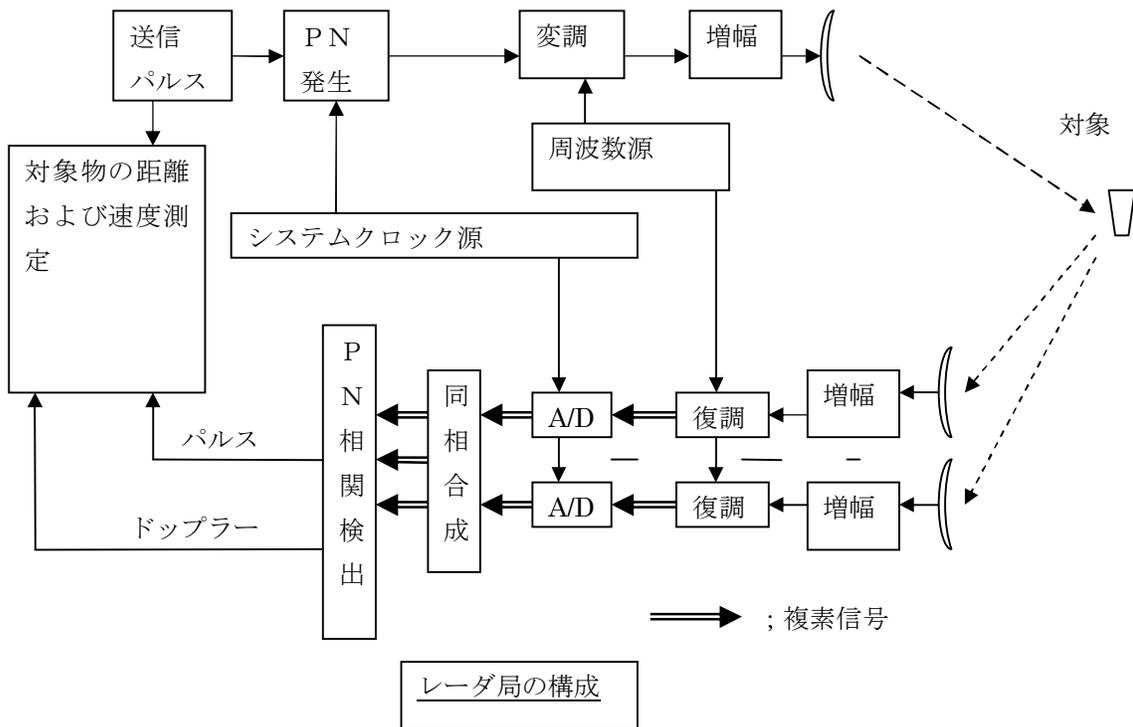
周波数拡散符号のC/Nは

$$C/N = C/N_o - 10\log(8.192 \times 10^5) = -29.53(\text{dB})$$

周波数逆拡散後のC/N=9.6(dB)

受信期間2に受信される信号はこれよりS/Nが劣化するがそれは前後のレーダー期間2の出力を加算する事によりS/N改善が可能である。

以上述べたレーダーシステムの構成を下図に示す。



3. ミサイル捕獲システム

[1] 従来のミサイル迎撃システム

従来のミサイル防衛システムは飛来して来るミサイルを打ち落とすものである。前述のミサイル追尾システムが十分精密に作動したとしても飛来するミサイルを別のミサイルで打ち落とす事は技術的に困難だと思われる。

多段式核ミサイルは発射時に重いミサイルを持ち上げるための初段ロケット、大気圏を突き破って宇宙空間に上げるための二段ロケットを次々に切り離して最後は核弾頭を搭載する機体のみになって飛行するのでそれを確実に打ち落とすには対象を感知するレーダーと対象に向かって飛行速度と方向を変えられる機能を備えたロケットが必要である。

[2] ミサイル捕獲システム

本稿で提案するのは対象の核ミサイルを打ち落とすのではなく、それを背後から追いかけて追いつき、捕獲するシステムである。これは宇宙システムにおいては既に宇宙ステーションへ人や物資を運ぶ宇宙船としてすでに技術は確立しているのでそれを応用する。

[3] 宇宙飛行体の方向を反転する方法

いまある方向に飛行している物体の質量を m 、速度を v とする。この物体の方向を反対方向に反転させるにはどうすれば良いであろうか。お迎えミサイルは対象ミサイルに追いつくのに大量の燃料を消費するのでできるだけ効率的な方向反転を行う事が必要である。

<>直接反転法

質量 m 速度 v で飛翔する物体を真正面から反転させるには $-2m v$ なる運動量を加える必要がある。すなわち元の運動量の2倍の運動量を宇宙空間にて発生する必要がある。

今、元の方向とは反対方向に力 f を加え続けるものとする。それによって生ずる加速度 a は

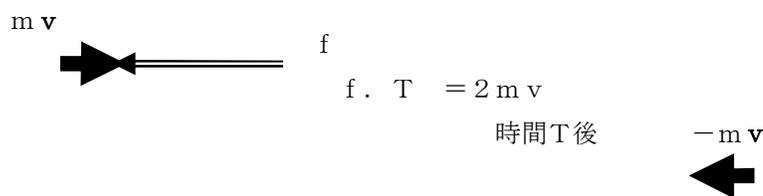
$$a = f / m$$

この加速度によって生じる速度を u とすると

$$u = a \cdot t = f / m \cdot t$$

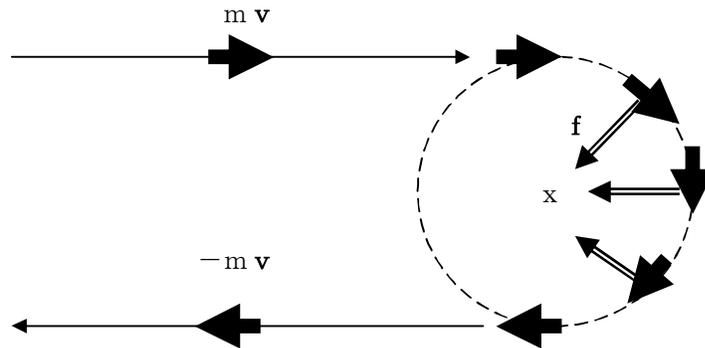
これが $2v$ に等しくなったところで丁度反転して元と同じ大きさの運動量を得る。それまで要する時間を T とすると

$$f \cdot T = 2 m v$$



<>半円反転法

物体の移動方向に直角に力を加え、半円を描いて方向を反転させる方法を如何に示す。



半円を描いて飛行体の方向を反転

今上記円の半径をRとすると上記半円を描くには飛行体に加えるべき力は

$$f = m \cdot v^2 / R$$

その向きは常に半円の中心である。

速さvで半径Rの半円を描くのにかかる時間をTとすると

$$T = \pi R / v$$

上の二式を掛けると

$$f \cdot T = \pi \cdot m v$$

上の二つを比較すると直接反転法の方がより効率的に反転できる。

今質量 $m = 10 \text{ ton}$, $v = 2000 \text{ m/s}$ の飛翔体を $T = 200$ 秒で反転させるのに必要な力は直接反転の場合

$$f = 2 m v / T = 2 \times 10 \times 2000 / 200 = 200 \text{ (tonf)}$$

となる。

半円反転の場合

$$f = \pi \cdot m v / T = 314 \text{ (tonf)}$$

[4] 発射元への返還

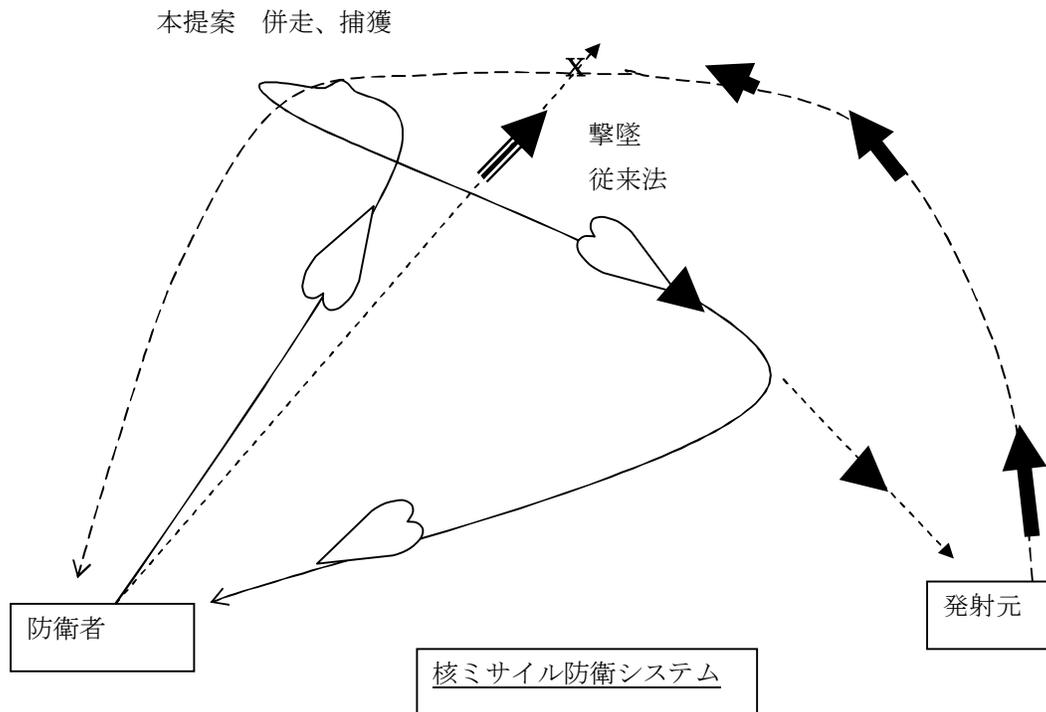
上述のように捕獲した核ミサイルを発射元に返還する。上記速度反転により方向としては発射元に向かうが正確に発射元に返還するにはお迎えロケットは運搬機能を維持してはならない。発射元に十分近いところまで運んだら核弾頭を切り離し、自身は母国に向けて帰還し、再利用される機能が必要である。

[4] 宇宙空間での破壊

核爆発の可能性があるので十分高度のある宇宙空間で破壊する。例えば地上から100km離れた宇宙空間で核爆発が起こり爆心から1kmにおいて一万度のエネルギー密度であるとしても地上にお

いては1度程度に弱まるので被害は小さいであろう。

以上述べたミサイル防衛の概念図を下に示す。



4. 結論

何時如何なる時にも発射された核ミサイルを即時検出、その位置、早さ等を測定しつつ追尾する事が可能である事を一つの衛星システム、及び地上の遠距離レーダーシステムの設計例によって示した。本提案においては核ミサイルを打ち落とすのではなくお迎えロケットは並走して捕獲する。捕獲した物は宇宙空間で破壊するか、向きを反転して発射元に運び、お返しする。このようなシステムが整備されれば核兵器は無意味となり、人類は核の脅威から解放されるであろう。

本稿においては基本思想を示すに止まり、システムの詳細、例えば監視衛星システムの構成、必要な通信回線の容量と構成、お迎えロケットの詳細、軌道、核弾頭の捕獲、破壊、発射元への運搬などについては筆者は殆ど白紙の状態である。既存のシステムでもある程度同様な事ができると思われるが、筆者はその関係の知識にも疎い。本システムの整備は広汎な分野の技術の総合が必要である。関連分野の関係者が更に検討を進めて核ミサイルを完全に無力化し人類が核の脅威から完全に開放される日の近い事を切望している。

参考文献

- [1] 虫明康人 アンテナ・電波伝搬、1960、コロナ社
- [2] 岩崎信夫、的川泰宣 宇宙工学 2010、JAXA