電波伝搬上の屈折効果がNNSS測位に及ぼす影響

木村 小一* 奈須 英臣*

NNSS Position Fixing Errors Resulting from Refraction Effects
on Radio Wave Propagation

Koichi KIMURA and Hideomi NASU

Abstract

For position fixing of the Navy Navigation Satellite System (NNSS), the distance between a satellite and a user is calculated on the assumption that radio wave propagates along the straight path. However, the path of radio wave is bent in ionospheric layer and its bending amount is calculated by frequency and electron contents in the layer. Also, its path is refracted in troposphere but tropospheric refraction is not affected by radio frequencies.

In this report, we calculated position fixing errors of NNSS resulting from radio wave refraction at following cases;

- (a) Residual positioning errors by tropospheric refraction after ionospheric refraction effect is compensated by two frequencies receiving equipment,
- (b) Positioning errors measured by one frequency (400 MHz band) receiving equipment as a result of ionospheric and tropospheric refractions.

1. はじめに

Navy Navigation Satellite System (NNSS) では、高度約1000kmの円極軌道をまわる衛星から399.968MHzの8/3の関係がある2つの周波数の電波を船上の受信装置で受信し、衛星（と船と）の移動に伴う受信周波数のドプラ効果を衛星からの2分ごとの時間信号の間、積算カウントすることによって、その2分間における両者の距離の変化（距離差）を求め、その3回以上の測定によって双曲線航法と同様にして航位を計算で求めている。この場合、計算では電波は直進すると仮定して計算を行なうので電波が伝搬の途中で屈折が生ずるとその分だけ電波の通路が長くなり、船位決定の際の誤差となって現われる。

NNSSで2つの周波数を使用しているのは、この屈折効果のうち、電離層内におけるその効果が電波の周波数の2乗に逆比例することを利用して、その影響のほとんどをとり除くためであるが、この場合でも周波数に無関係に生ずる対流圏での屈折効果の影響を受けることになる。最近、商船用の受信装置としての経済性のため、400MHz帯1波のみを利用する装置が普及を見ているので、この場合は電離層による屈折効果を避けることができない。

そこで、ここではこれらの屈折効果がどの程度の測位誤差となるかをモデル計算によって求めてみたのでその方法および計算結果について報告する。

2. 電離層および対流圏による電波の屈折

人工衛星からの電波は図1に示すとおり電離層と対流圏とを通り抜けてくる。電離層は周知のとおり、地球上層の希薄な太陽からの放射

図1 電波の経路

* 運輸省電子航法研究所（三鷹市新川6-38-1）

線によってイオンと電子に電離している層であってその下限は数十km 上限は800~1000km 付近にあり、その間に電子の密度がピークを示すD層、E層、F (F₁, F₂) 層などと呼ばれる層が存在する。従って高度 1000km の衛星からの電波はこれらの層のすべてを通り抜けてくることになる。

これらの電離層の中の屈折率を n で示すと

$$n = \{1 - (\omega_p/\omega)^2\}^{1/2} \quad \text{.....(1)}$$

で表わされる。ここで ω_p はプラズマ角周波数と呼ばれるもので $\omega_p^2 = Ne^2/\epsilon_0 m \approx 3.18N \times 10^3$ (MKS), N は 1 m^3 当りの電子密度, e は電荷, ϵ_0 は自由空間の誘電率, m は電子の質量, また ω は電波の角周波数で $\omega = 2\pi f$ である。従って, $n = \{1 - 3.18N/(2\pi f)^2\}^{1/2}$ となり, $n < 1$ である。

電波の位相速度が早くなるような媒質中での電波の伝搬経路長 R は $R = \int (1/n) ds$ (但し $n < 1$) となり, 真空中の伝搬経路長との差 ΔR は

$$\Delta R = \int \{(1/n) - 1\} ds = \{1.6 \times 10^3 / (2\pi f)^2\} \int N ds \quad \text{.....(2)}$$

となる。この場合、電離層内の電子密度 N は高度によって複雑な分布をとるので、それに応じて積分をする必要がある。しかし、ここでは大略の傾向を求めるという意味で、均一の電子密度の層を仮定し、その高さ方向の積分値 $\int N dh$ に全電子含有量 (total electron content) E (electrons/ m^2) という値を使うことにした[1]。斜め伝搬の場合の ds と dh の間には $ds = dh/\sin \theta$ の関係、 θ は仰角、があるので(2)式は

$$\Delta R = (40.5/f^2) E (1 - 0.928 \cos^2 \theta)^{-1/2} \quad \text{.....(3)}$$

となる。ここで 0.928 という係数はカッコ内を 0 にしないための配慮である。400MHz 帯の電波に対しては当然

$$\Delta R = 40.5 E (1 - 0.928 \cos^2 \theta)^{-1/2} / (400 \times 10^6)^2 \quad (\text{m}) \quad \text{.....(4)}$$

となる。

なお、400MHz 帯と 150MHz 帯の 2 波を使って電離層屈折の効果を補償すると、そのときの ΔR の値は(4)式で求めた 400MHz 帯での値の 1/100 以下になるということが報告されている。[2]

一方、対流圏での電波の屈折率は $n = (\epsilon/\epsilon_0)^{1/2}$ であり、ここで ϵ は大気中の誘電率である。 $\epsilon > \epsilon_0$ ゆえ $n > 1$ となる。ここで大気の誘電率は大気密度と水蒸気分圧により変化するが、ここでの略算では NNSS の対流圏伝搬による屈折の補正として Johns Hopkins 大学が小型計算機用に開発した式

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= \Delta \rho_d + \Delta \rho_w \\ &= 2.278 P \operatorname{cosec} \sqrt{\theta^2 + 2.5^2} \times 10^{-6} + k_w \operatorname{cosec} \sqrt{\theta^2 + 1.5^2} \quad (\text{m}) \quad \text{.....(5)} \end{aligned}$$

を使った[3]。ここで $\Delta \rho$ は伝搬経路長の増分, $\Delta \rho_d$ と $\Delta \rho_w$ は乾と湿のその値, P は気圧, k_w は定数でその値は表 1 に示す。また θ は仰角である。この式から求めた $\Delta \rho$ は $\theta > 5^\circ$ ではよく合致し, $\theta > 2^\circ$ では良く近似す

表 1 対流圏における伝搬経路の増加

(m)

場所・季節	k_w	気圧 mb	仰角 0°	5°	15°	30°	60°	90°
熱帯 中緯度の夏	0.28	1063	66.2	27.9	10.3	5.3	3.1	2.7
		1013	63.5	26.7	9.8	5.1	2.9	2.5
		963	60.9	25.5	9.4	4.9	2.8	2.4
中緯度	春秋	1063	63.1	27.0	10.0	5.2	3.0	2.6
		1013	60.5	25.8	9.5	5.0	2.8	2.5
		963	57.9	24.7	9.1	4.7	2.7	2.3
	冬	1063	60.0	26.1	9.6	5.0	2.9	2.5
		1013	57.4	25.0	9.2	4.8	2.8	2.4
		963	54.8	23.8	8.8	4.6	2.6	2.3

備考 寒帯は $k_w = 0.05$

るという。

3. 屈折効果に伴う伝搬路長の増加量

前節の式(4)と(5)を用いて伝搬経路長の増分を求めた。電離層の全電子含有量については人工衛星を使いたいくつかの観測例が報告されている。その一例を述べるならば、1958年11月から翌年5月までに亘って Ohio 大学で測定した例〔4〕では 1.1×10^{17} electrons/m², 昼間最高になるのは地方時の14~15時でその値は $8.5 \sim 5.5 \times 10^{17}$ electrons/m² であったという。また1964年秋に Hawaii 大学で測定したデータ〔5〕では夜間約 0.5×10^{17} electrons/m², 昼間最大が $6 \sim 2 \times 10^{17}$ electrons/m² と前者よりも少ない値となっている。そこで、ここでは、この全電子含有量を $1 \sim 9 \times 10^{17}$ electrons/m² の範囲について各仰角ごとに伝搬経路長を求め、その値を図2に示す。なお、赤道の僅か南北で全電子含有量が異常に大きくなるなどの現象もあり〔6〕, 衛星の通路によっては必ずしも均一の電子量ではないが、ここでは簡単のため衛星の一通路当りの電子量は均一と仮定した。

また、対流圏での屈折による経路長増は k_0 の各値および二、三の気圧について求めたが、図ではその差が顕著には表わせないので、表1に代表的な仰角について示してある。このほうは仰角が低くなるにつれて、その増分が急激に増大するが、高仰角では数mとほとんど影響がないことを示している。

図2 電離層による経路長増

4. 伝搬経路長の増加による測位誤差の計算方法

これらの前節の値を使って、それがNNS Sの測位誤差にどの程度の影響を与えるかを求めた。その方法は先に発表した船の速度誤差を求めたのと同様な方法によった。すなわち、衛星の軌道は実際の衛星のものをそのまま使用した。使用したデータは NNS S3012の46年3月11日の北に向う軌道のもの、NNS S3019の同年4月11日の南に下がる軌道とで、そのほかの衛星についても同様の計算を行なったが、その結果はほとんど変化なかったもので、ここでは上記2例について求めた結果を示す。この軌道に対し北緯の中緯度の受信点を仮定し、その位置を左右にずらすことによって衛星を見る最大仰角（衛星が受信点に最も接近したときの仰角）を変化させた受信点を作った。そして受信点と2分ごとの衛星位置との間の距離を求めた。そしてその距離にそれぞれの仰角、全電子含有量、対流圏屈折のパラメータに応じて求めた経路長増の値を加え、2分間の前後の距離の差からよく知られている式

$$N_k = \Delta F \cdot \Delta T + (1/\lambda_L) [D(t_k) - D(t_{k-1})] \quad \dots\dots(6)$$

を用いて2分間の積算ドプラカウント値 N_k を求めた。ここで、 N_k はドプラカウント値、 ΔF は衛星と受信機内の局発振器との周波数オフセット値、 ΔT は2分、 λ_L は受信機局発振器の発振波長、 $D(t_k)$, $D(t_{k-1})$ はそれぞれ t_k , t_{k-1} における衛星と受信機間の距離である。そしてその値により測位計算を行ない、得られた位置とはじめに仮定した受信点との差を測位誤差とした。

伝搬経路長増加はつぎの3つについて求めた。

- (1) 400MHz 1波の電離層での屈折によるもの。これ単独で生ずることはないので実用的な意味はあまりない。
- (2) 対流圏での屈折によるもの。これは2周波利用の受信装置で、電離層における屈折効果の補償を行なった場合に相当する。
- (3) 400MHz での電離層屈折と対流圏屈折の両効果を加算したもの。400MHz 帯1波の受信装置による誤差に対応する。

5. 電離層屈折による測位誤差

図3は南から北に向う衛星の場合の全電子含有量 5×10^{17} electrons/m² での電離層屈折による測位誤差の大きさと生ずる方向を示している。図からも明らかなように測位誤差は経度方向に大きく広がり、衛星を見る最

大仰角が大きくなるほど、すなわち、衛星が受信点の上空近くを通るほど誤差が大きくなる。そして、測位誤差は衛星軌道に近寄る方向に現われる。

この誤差の緯度方向と経度方向の成分を別々に図に示したのが図4と図5である。経度方向の分は緯度方向のそれよりも1桁大きく、衛星を見る最大仰角が 80° 以上では急激に誤差が増大する傾向にある。

図3 電離層屈折による測位誤差の大きさと方向

図4 電離層屈折による緯度方向の測位誤差

図5 電離層屈折による経度方向の測位誤差

南下する軌道の衛星では図5はほとんど大差ないが、図4は左右対称的な右下りの結果が得られる。これは極軌道の衛星の場合でも地球上への衛星軌道の投影が地球の自転によって 4° 前後の傾斜をもつことになり、その傾斜が南下と北上の衛星軌道では逆の関係になるので、例えば図3で最大仰角 80° の測位点が西側で下がり東側で上っているが南下軌道では逆に西側の分が北に東側の分が下がり南側に来るためと考えられる。

6. 対流圏屈折による測位誤差

ここでは季節の差などによる測位誤差を求めたが図に明示するほどその差異が現われないので、図6には気温の高いときの標準気圧での測位誤差をここでは半径方向の値で示してある。誤差の生ずる方向は前節と同様に経度方向に大きく現われ、かつ衛星の軌道に近づく方向に生ずる。

電離層屈折による場合と異なる点は衛星を見る最大仰角が 30° 以下になると測位誤差が大きくなる点で、これは表1にも示すように低仰角での屈折効果が大きく生ずるためである。しかし、それを含めても誤差の絶対値は電離層の場合より遙かに少ない。

図6で実線で示した曲線はドブラ積算カウント値を7~8個使って求めたときの値であるが、衛星からの信号が受信されはじめた最初の1個と最後の1個、つまり衛星が仰角の低いところにいるときのドブラカウント値2個を除いて測位計算を行なったときの測位誤差の値を西側通過の場合を点線で示してある。この場合は低仰角による経路長増加の寄与が減少するため測位誤差がほぼ半減する効果をもたらすが、あまりドブラカウント値が少なくなると不良データの寄与が増大するという別の面もあるので、良質なドブラカウント値が多くとれたときに始めと終りのドブラカウント値を捨てて再計算する方法の利点がこれによっても示されている。

図6 対流圏屈折による測位誤差

7. 電離層と対流圏の両屈折効果を考えたときの測位誤差

400MHz 帯1波, 中緯度春秋で全電子含有量 $1 \sim 9 \text{ electrons/m}^2$ のときの総合の半径方向の測位誤差を図7(a)に示す。夜間のような $1 \times 10^{17} \text{ electrons/m}^2$ のように電離層屈折の効果の少ないときの低仰角では対流圏のほうの効果が僅かに出ているが, その他の場合はほぼ図4と図5から求めた電離層だけの屈折効果の値と大差がないことは両者の経路長増の割合から見ても明らかである。また図7(b)は図6の点線で示したのと同様に最初と最後のドブラカウント値を除外して測位計算を行なった場合で(a)と比較すると図6ほどではないが高仰角で若干の誤差の改善が見られている。

(b)

(a)

一般に 400 MHz 帯1波の使用の

NNSS 測位では電離層屈折による測

位誤差が夜間で 0.1 n.m. 昼間で 0.3~0.5 n.m. 程度といわれているがこれは夜間 1×10^{17} 以下, 昼間 $3 \sim 5 \times 10^{17} \text{ electrons/m}^2$ で最大仰角 $60 \sim 70^\circ$ 程度まででそのような値が得られていることが図からも明らかになったと云えそうである。

8. むすび

以上のような解析結果が得られたが, これと実測結果との比較については, 受信データの中の電離層誤差成分のみを取出すことがこの時点が困難であったので, これを示すことができなかった。今後更に検討を進める予定であるが, この結果から電離層および対流圏における電波の屈折効果と測位誤差との大略の傾向が求められたので測位データの取扱いについての一応の目安となるものと思われる。将来は更に進んで電波予報などを使った補正方法まで進みたいとも考えている。

参考文献

- [1] Position Location and Aircraft Communication Equipment (PLACE), Goddard Space Flight Center X-731-67-159 Apr. 1967
- [2] W. H. Guier: Ionospheric Contribution to the Doppler Shift at VHF from Near-Earth Satellite, Proc. IRE, Sept. (1961)
- [3] J. B. Moffott: Program Requirements for Two-minute Integrated Doppler Satellite Navigation (AD 731663) の Appendix D
- [4] T. G. Hame(他): The Electron Content and Distribution in The Ionosphere, Proc. IRE, 48, Mar. (1960)
- [5] O.K. Garriott(他): Observations of Ionospheric Electron Content Using a Geostationary Satellite, Planet. Space Sci. 13 (1965)
- [6] 例えば, 中田美明: 全電子数の赤道異常, 電波研究所季報 18, 94 (Jan. 1972)

〔質問〕

1. 電離層擾乱の場合の修正法はどうしますか。

2. 速力誤差による船位誤差との関連はどうですか。

(田口 一夫)

〔解答〕

この研究では将来は誤差補正のところまでもって行きたいが、電離層擾乱のときの補正はかなりむずかしいと思うが、全電子数を少なく見積って補正しても、補正しないよりは良い測位結果が得られることになるだろう。第2の点の他の要因による測位誤差との関連は、それぞれの誤差をベクトルの（といってもほとんど経度方向）に加算した形になると思う。

〔質問〕

電波速度として群速度を使うべきではないか。また電離層屈折に地磁気の効果考えたか。(今津 隼馬)

〔解答〕

ここでは屈折率が生ずる理由として位相速度を出したのである。地磁気の効果については、略算値でもあり全く考えていない。