

The dependence of the frequency drift rate of solar radio bursts on frequency at a distance $R_{sun} \ll r$

Batmunkh Damdin^{1*}

¹Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Received: 2025-10-31, Accepted: 2025-12-28, <https://doi.org/10.5564/mjag.v12i1.5198>

*Corresponding author: batmunkh@iag.ac.mn 0000-0002-9990-0898

Abstract

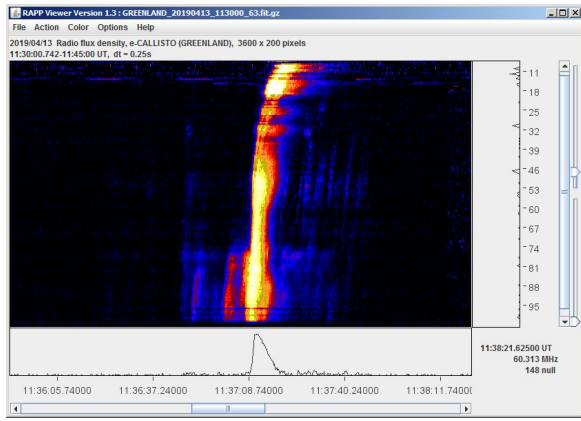
In this paper, the frequency drift rate of solar radio bursts (type III) is considered for the case $R_{sun} \ll r$. The electron density of the solar corona at a distance under the above conditions is approximated by the dependence $n_e \sim r^{-b}$, obtained from formulas given in the works of many researchers. For type III radio bursts, using the relationship between the radiation frequency and the electron density of the surrounding medium $\nu = 9000\sqrt{n_e}$, it is shown that for the case $R_{sun} \ll r$ it is equal to $d\nu/dt \sim -\nu^{1+b/2}$. If we use empirical formulas for the electron density, which are well satisfied under the condition $R_{sun} \ll r$, then in most cases it is equal to $d\nu/dt \sim -\nu^2$. Many researchers have referred to the ratio $d\nu/dt \sim -\nu^{1.84}$, which was determined by Alvarez in 1973 in the frequency range 74kHz-550MHz. If we compare our result with this dependence, the frequency drift rate will change by $\nu^{0.16}$ times.

Keywords: Sun: corona, electron density, radio bursts, frequency drift rate

1. Удиртгал

Нарны когерент радио цацраг буюу плазмын цацрагийг үүслийн механизм болон ажиглагдах хэлбэр, бүтэц буюу морфологи шинжээр нь Type I, II, III bursts, Type J bursts, Type U bursts гэж ялган ангилдаг. Нарны эдгээр радио гялбааг Швейцарийн Цюрихт төвтэй CALLISTO-“Compound Astronomical Low frequency Low cost Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory” сүлжээ станцууд Дэлхийн бөмбөрцгийн 60 гаруй цэгүүдэд байрлаж долгионы давтамжийн 45-870 МГц завсарт 62.5 кГц нарийвчлалтайгаар тасралтгүй бүртгэдэг бөгөөд Хүрэл тогоот Одон орны оргилд нэг нь ажиллаж байна. Нарны титэмд эхлэн үүсдэг тэсрэлт, эсвэл титмийн нүхнээс үүссэн хурдан бөөмс

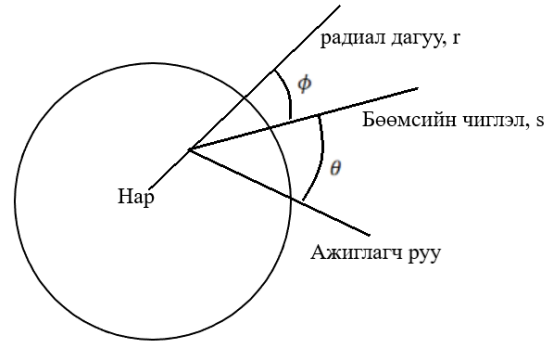
(0.1-0.3с, с- гэрлийн хурд) нарны төвөөс дээш чиглэлд нээлттэй соронзон орны шугамын дагуу титмийн плазмаар дайран гариг хоорондын плазмд тархахад (upward propagating beam) орчны плазм дахь чөлөөт электрон хэлбэлзэлд орж, улмаар энэхүү энергийн зарим хэсэг радио цацрагт шилжин радио гялбаа хэлбэрээр ажиглагдах ба цацаргалтын давтамж (ν) нь плазмын давтамжтай ойролцоо байдаг ($\nu \approx 9000\sqrt{n_e}$). Титмийн нэгж эзлэхүүн дэх электроны агууламж буюу электрон нягт (n_e) нарны радиусын дагуу, тухайлбал $1/r^2$ хамаарлаар хувьсан өөрчлөгдөх тул цацаргалтын давтамж (ν) мөн адил электрон нягтаас шууд хамааран давтамж шилжилт ажиглагдана (Зураг. 1, давтамж 95 МГц-ээс 11 МГц хүртэл шилжиж байна). Ажиглалтын спектрээс тодорхойлдог нэг параметр бол түү-



Зураг 1. Callisto радиоспектрометрээр авсан Нарны III төрлийн радио гялбааны спектр. Босоо координат: давтамж (MHz), хэвтээ нь хугацаа ($h : m : s$). Маш богино хугацаанд давтамж 95MHz-ээс 11MHz хүртэл тасралтгүй шилжиж байна.

ний Давтамж шилжилтийн Хурд (ДШХ, dv/dt) юм (Alvarez & Haddock, 1973; Mann et al., 1999; Zhang et al., 2018; Aschwanden et al., 1995). Энэхүү (dv/dt) нь давтамжаас (ν^e) хэлбэрээр хамаарах бөгөөд ажиглалтын спектрийн боловсруулалтаас үзэхэд (ϵ) утга давтамжийн янз бүрийн зурваст өөр өөр байгааг дээрх ажлуудаас харж болно.

Нарны агаар мандлын давхаргууд, гариг хоорондын орон зай зэрэг орчнууд физик нөхцөлөөрөө ихээхэн ялгаатай байдаг тул электрон нягтын зайн хамаарал үүнтэй холбоотойгоор нарийн төвөгтэй байдаг. Нарны титмээс Дэлхийн тойрог зам хүртэлх зайд (1AU) электрон нягтыг тодорхойлсон эмпирик томъёо бүхий олон ажлууд бий (Baumbach, 1937; Newkirk, 1961; Saito et al., 1977; Vásquez et al., 2003) гэх зэрэг. Нарны радио гялбааны цацрагийн давтамж, орчны электрон нягтын холбоо III төрлийн гялбааны хувьд $\nu = 9000\sqrt{n_e}$ юм. Энэхүү ажилд радио гялбааны давтамж шилжилтийн хурд, давтамжаас ($dv/dt \sim -\nu^e$) хэрхэн хамаарахыг $R_{sun} \ll r$ тодорхой тохиолдолд тогтоож, (ϵ) ямар байж болохыг харуулах зорилт тавьсан юм.



Зураг 2. Нарны радио гялбаа үүсгэгч электрон багц урсгал Нарны титэм дундуур дайран өнгөрөх тойм зураг.

2. Давтамж шилжилтийн хурдыг тодорхойлох арга ($R_{sun} \ll r$)

Давтамж шилжилтийн хурд нь $n_e(r), \phi, \partial s/\partial t$, зэрэг параметруудээр тодорхойлогдоно ((Benz, 2002)).

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{\partial \nu}{\partial n_e} \frac{\partial n_e}{\partial r} \cos \phi \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

ϕ бөөмсийн багц урсгалын чиглэл болон босоо (vertical) чиглэл хоорондын өнцөг, $\partial s/\partial t$ - (s) чиглэлийн дагуух тухайн бөөмсийн хурд бөгөөд $\partial s/\partial t = v_s/2(1 - \beta \cos \theta)$, $v_s = \beta v_{gr}$, v_{gr} - бүлэг хурд, эдгээр нь давтамжаас үл хамаарна.

Ихэнх эмпирик томъёоноос харахад электрон нягтыг n_e нарнаас $R_{sun} \leq r$ зайд дараах хамаарлаар өндөр нарийвчлал шаардагдахгүй тохиолдолд тодорхойлж болох нь тоон тооцооллоос (Тэг. 3) харагдаж байна. Электрон нягтыг ийм хэлбэрээр авч тооцоолсон зарим ажлуудыг нэгдүгээр хүснэгтээр үзүүлэв.

$$n_e = ar^{-b}, \quad R_{sun} \ll r, \quad (2)$$

a, b -тогтмол тоонууд. Нарны радио гялбааны цацрагийн давтамж (ν), орчны электрон нягтын холбоо III төрлийн радио гялбааны хувьд дээр дурдсан ёсоор плазмын цацрагийн давтамжаар (ν_ρ):

$$\nu \approx \nu_\rho = c\sqrt{n_e} \quad (3)$$

$c \approx 9000 Hz$. Тэг. 2-ийг Тэг. 3 руу орлуулж r^{-1} олвол

$$r^{-1} = a^{-1/b}(\nu/c)^{2/b} \quad (4)$$

Тэг. 1 дэх томъёоны давтамжаас хамаарах хэсэг нь Тэг. 4-ийг тооцон хялбар хувиргалтын дараа:

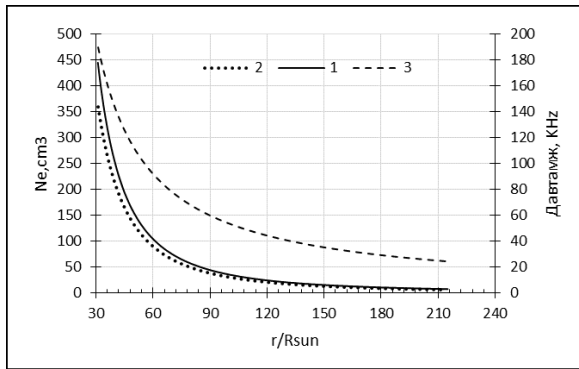
$$\frac{\partial \nu}{\partial n_e} \frac{\partial n_e}{\partial h} = -\nu \frac{b}{2r} = -\nu^{1+2/b} const$$

Хүснэгт 1. Нарнаас алслагдсан зайд 3-р төрлийн радио гялбааны давтамжийн шилжилтийн хурд ба давтамжийн хамаарал (томъёо 5).

№	$n_e(r)$	dv/dt	Ном зүй
1	$5.52 \times 10^7 r^{-2.63}$	$-\nu^{1.76}$	(Fainberg & Stone, 1971)
2	$2.75 \times 10^6 (r - 0.95)^{-2.38}$	$-\nu^{1.76}$	(Alvarez & Haddock, 1973)
3	$7.0 \times 10^6 r^{-2.29}$	$-\nu^{1.84}$	(Robinson, 1992)
4	$1.36 \times 10^6 r^{-2.14}$	$-\nu^{1.87}$	(Saito et al., 1977)
5	$6.1 \times 10^5 r^{-2.1}$	$-\nu^{1.93}$	(Bougeret et al., 1984)
6	$3.3 \times 10^5 r^{-2}$	$-\nu^{1.95}$	(Leblanc et al., 1998)
7	$3.2565 \times 10^5 r^{-2}$	$-\nu^{1.2}$	(Vásquez et al., 2003)
8	$7.2 \times 10^5 r^{-2}$	$-\nu^{1.2}$	(Brandt, 1973)

Хүснэгт 2. Нарны 3-р төрлийн радио гялбааны давтамжийн хамаарал $dv/dt = -A\nu^\epsilon$.

Ном зүй	Давтамж	A	ϵ
(Alvarez & Haddock, 1973)	75 kHz–550 MHz	0.01	1.84
(Mann et al., 1999)	40 kHz–85 MHz	0.01	1.84
(Zhang et al., 2018)	10–80 MHz	0.0074	1.76
(Aschwanden et al., 1995)	200–3000 MHz	0.0672	1.23



Зураг 3. $1 - n_e = a_1 \exp(a_2/r) r^{-2} (1 + a_3 r^{-1} + a_4 r^{-2} + a_5 r^{-3})$ (Vásquez et al., 2003),
 $2 - n_e = 6.1e05 r^{-2.1}$ (Bougeret et al., 1984),
 $3 - \nu = c\sqrt{n_e}$

буюу

$$\frac{d\nu}{dt} \sim -\nu^{1+\frac{2}{b}} = -\nu^\epsilon \quad (5)$$

$n_e \sim r^{-b}$, (b) ямар байхаас хамааран ДШХ-ийн ($\epsilon = 1 + \frac{2}{b}$) тодорхойлогдож байна. Хэрэв $b = 2$ бол $dv/dt \sim -\nu^2$ хамааралтай байна.

3. Хэлэлцүүлэг ба үр дүн

74 КHz – 550 МHz давтамжийн завсарт ажигласан III төрлийн радио гялбааны олон тооны мэдээллээр давтамж шилжилтийн хурдыг тодорхойлж хамгийн сайн зохис-

той шийд олсон хамаарал бол $dv/dt \approx -0.01\nu^{1.84} [MHz s^{-1}]$ (Alvarez & Haddock, 1973). Түүнчлэн 200 МHz – 3000 МHz завсарт бол $dv/dt \approx -0.1\nu^{1.4} [MHz s^{-1}]$ (Aschwanden et al., 1995). Зураг. 3 дээрх тооцооноос үзэхэд, 74 КHz давтамжид харгалзах зай $r \approx 73R_\odot$. Нарийвчлал сайтай (Vásquez et al., 2003) бодсон дүнтэй (Bougeret et al., 1984) нарын дүн буюу Тэг. 2 томъёоны тооцоололтой харьцуулахад $R_{sun} \ll r$ зайд утгууд сайн дүйж байгаа тул ашиглаж болохыг харуулж байна.

Хүснэгт. 1 дээр судлаачдын олон ажилд томъёологдсон электрон нягтын хамаарал болон тэдгээрээр тодорхойлсон $\epsilon = 1 + 2/b$ утга нь $1.76 \div 2.0$ буюу ДШХ $\nu^{1.76} \div \nu^2$ хооронд хэлбэлзэж байгаа боловч дунджаар ν^2 гэж үзэх үндэслэл харагдаж байна. Ихэнхэд нь ингэж гарч байна. Хүснэгт. 2 дээр ажиглалтын утгаар fit хийсэн хамаарлын зэрэг $\epsilon = 1.23 \div 1.84$ байна. Гэхдээ энд ашигласан спектрүүд $73R_{sun} > r$ мужид байсан байна. Дээрх бидний тооцооллоор $R_{sun} \ll r$ тохиолдолд $dv/dt \sim -\nu^{1+\frac{2}{b}} \approx -\nu^2$ байх боломжтой юм (Тэг. 5).

4. Дүгнэлт

Нарны плазмд, ялангуяа титэмд чөлөөт электроны агууламж их учир титэмд

явагддаг физик процесст чөлөөт электрон чухал үүргийг гүйцэтгэдэг, иймд электрон нягтыг тооцоолох, аналитик хэлбэр тодорхойлох нь ихээхэн ач холбогдолтой юм. Нарны гэрэлт мандал, өнгөт мандал болон дотоод титмийн хувьд спектрийн шугамын тооцоог тодорхой загвар дээр бодох замаар физик параметруудийг тоон утгаар нарийн тодорхойлдог. Тэгвэл, гариг хоорондын орон зайд явуулсан судалгаагаас харахад Дэлхийн тойрог зам хүртэлх зайд (1AU) электрон нягтыг ихэвчлэн эмпирик томъёогоор дүрслэн ашигласан байдаг (Хүснэгт. 1). Нарны титмийн зах хязгаар хаана хүрдгийг нарийн тодорхойлсон судалгаа алга байна. Дэлхий орчимд сансрын станцад бүртгэгдсэн электрон нягт $\sim 7 \div 10^{-3}$ байна. Энэ бол нэг захын нөхцөл. Дээрх томъёонууд үүнийг хангах ёстой. Нарны радио гялбаа үүсгэгч электрон багц урсгал, ялангуяа хүчтэй тэсрэлтийн үед, титмийн масс шидэлтийн (СМЕ) үед хэдэн арван нарны радиус зайд буюу гариг хоорондын орон зайд тархаж III төрлийн радио гялбаа ажиглагдаж байна (100MHz давтамжаас хэдэн арван КHz хүртэл). Энэ үед Нарны III төрлийн радио гялбааны ДШХ $dv/dt \approx -Av^2$ буюу ерөнхий тохиолдолд $dv/dt \sim -v^{1+2/b}$ гэсэн дүгнэлтийг хийж байгаа юм (Тэг. 5).

Талархал

Нарны радио гялбааны спектрийг тасралтгүй бүртгэдэг олон улсын e-callisto сүлжээнд “Callisto at Mongolia” станц оролцож ихээхэн багтаамж бүхий спектр өгөгдлийн сангийн үнэт мэдээллийг судалгаандаа ашиглаж байна.

Ашигласан номзүй (References)

- Alvarez, H. & Haddock, F. T., 1973. Solar wind density model from km-wave type iii bursts, *Solar Physics*, **29**(1), 197–209, <https://doi.org/10.1007/BF00150893>.
- Aschwanden, M. J., Benz, A. O., Dennis, B. R., & Schwartz, R. A., 1995. Solar electron beams detected in hard x-rays and radio waves, *The Astrophysical Journal*, **455**, 347–365, <https://doi.org/10.1086/176586>.
- Baumbach, S., 1937. Strahlung, ergiebigkeit und elektronendichte der sonnenkorona, *Astronomische Nachrichten*, **263**(6), 121–134.
- Benz, A. O., 2002. *Plasma Astrophysics: Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae*, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0486-6>.
- Bougeret, J.-L., King, J. H., & Schwenn, R., 1984. Solar radio bursts and in situ determination of interplanetary electron density, *Solar Physics*, **90**(2), 401–412, <https://doi.org/10.1007/BF00216273>.
- Brandt, J., 1973. *Solar Wind*, Nauka, Moscow.
- Fainberg, J. & Stone, R. G., 1971. Type iii solar radio burst storms observed at low frequencies, *Solar Physics*, **17**, 392–405, <https://doi.org/10.1007/BF00150010>.
- Leblanc, Y., Dulk, G. A., & Bougeret, J.-L., 1998. Tracing the electron density from the corona to 1 au, *Solar Physics*, **183**(1), 165–180, <https://doi.org/10.1023/A:1005049730506>.
- Mann, G., Jansen, F., MacDowall, R. J., Kaiser, M. L., & Stone, R. G., 1999. A heliospheric density model and type iii radio bursts, *Astronomy & Astrophysics*, **348**, 614–620.
- Newkirk, G., 1961. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation, *The Astrophysical Journal*, **133**, 983–1013, <https://doi.org/10.1086/147104>.
- Robinson, P. A., 1992. Radial variation of type-iii source parameters, *Solar Physics*, **137**(2), 307–315, <https://doi.org/10.1007/BF00151943>.
- Saito, K., Poland, A. I., & Munro, R. H., 1977. A study of the background corona near solar minimum, *Solar Physics*, **55**(1), 121–134, <https://doi.org/10.1007/BF00150879>.
- Vásquez, A. M., van Ballegoijen, A. A., & Raymond, J. C., 2003. The effect of proton temperature anisotropy on the solar minimum corona and wind, *The Astrophysical Journal*, **598**(2), 1361–1374, <https://doi.org/10.1086/379007>.
- Zhang, P. J., Wang, C. B., & Ye, L., 2018. A type iii radio burst automatic analysis system and statistical results for a half solar cycle, *Astronomy & Astrophysics*, **618**, A165, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832842>.