

УДК 551.5

МНОГОПОЗИЦИОННАЯ РАЗНЕСЕННАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТЕОРНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Показано можливість дослідження розподілу метеорної речовини рознесеною системою метеорної радіолокації, яка використовує сигнали ТВ-мовлення

Ключові слова: метеорний слід, рознесена РЛС, ТВ сигнал

Показана возможность исследования распределения метеорного вещества разнесенной системой метеорной радиолокации, использующей сигналы ТВ-вещания

Ключевые слова: метеорный след, разнесенная РЛС, ТВ сигнал

Possibility of research of distribution of meteoric material by means of the forward scatter meteor radar system in which is used by TV broadcast signal is shown

Key words: meteor trail, forward scatter meteor radar system, TV signals

Ю. В. Лыков

Старший преподаватель*

Контактный тел.: 068-107-32-98

E-mail: yusik@3g.ua

Д. Ю. Горелов

Кандидат технических наук, старший преподаватель*

Контактный тел.: 067-572-79-95

E-mail: 4elvin@mail.ru

А. А. Лыкова

Ассистент*

*Кафедра «Основы радиотехники»

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина 14, г. Харьков, Украина

Контактный тел.: 068-107-32-97

E-mail: laa@i.ua

1. Введение

Последние годы характеризуются значительным увеличением количества обнаруженных малых тел в Солнечной системе (астероидов и ядер комет), орбиты которых тесно сближаются с орбитой Земли. Поэтому проблемы исследования эволюции метеорной составляющей Солнечной системы, происхождения метеорных потоков и их связей с возможными родительскими телами – кометными ядрами и астероидами – в настоящее время весьма актуальны. Решение данных задач основано на статистической обработке параметров орбит метеорных тел. Следовательно, актуальной является и проблема увеличения объема выборки параметров орбит, зарегистрированных наземными

методами, метеороидов из генеральной совокупности, которой является весь комплекс исследуемых метеорных тел в Солнечной системе.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует достаточно развитая сеть наблюдательных пунктов. Сейчас во всем мире насчитывается не более десяти метеорных РЛС, ведущих регулярные измерения. Причем эти станции являются, как правило, специализированными, предназначенными для решения узкого круга задач, имеют различные технические характеристики, что значительно усложняет сопоставление и интерпретацию результатов наблюдений. Последнее объясняется высокими затратами на организацию метеорной РЛС и ее техническое обслуживание.

Для исследования притока метеорного вещества в атмосферу Земли необходимо исследовать следующие: амплитуду сигнала отраженного от метеорного следа (по которой можно определить массу метеорного тела), численность метеорных отражений и радианты индивидуальных метеоров.

Одним из возможных решений построения сети наблюдательных пунктов является создание более простых и экономичных систем метеорных РЛС с использованием сигналов телевизионных передатчиков метрового диапазона. Для проведения непрерывных исследований по изучению метеорной составляющей в Солнечной системе предлагается использование многопозиционной системы разнесенной радиолокации.

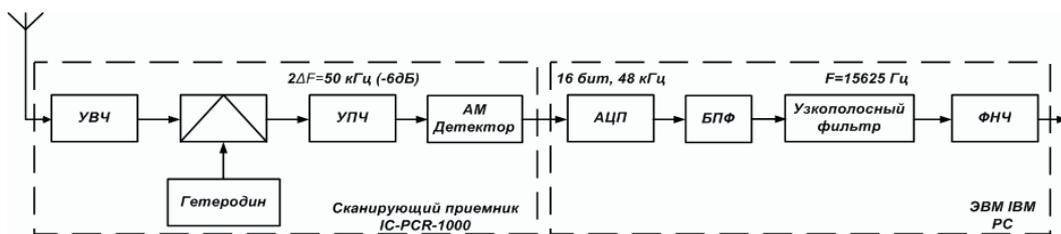


Рис. 1. Функциональная схема измерителя амплитуды СГИ

ющая частоте повторения строчных гасящих импульсов. Для сглаживания экстремумов сигнал проходит через фильтр нижних частот. По приведенной методике удастся получить до 150 АВХ отраженных от метеорных следов сигналов в утренние часы, при среднем числе около 30 в час. Для этих целей применялись: радиоприемник IC PCR-1000, приемная антенна типа 3-х элементный волновой канал, передатчик Останкинского телецентра (частота излучения 49.75 МГц, мощность 50 кВт) на удалении 720 км до приемного пункта.

Таким образом, с помощью разнесенной системы можно измерять амплитуду сигнала отраженного от метеорного следа и численность метеорных отражений.

2. Система разнесенной радиолокации метеорных следов

В отличие от совмещенной метеорной РЛС, где приемник и передатчик находятся в одной точке пространства, и зона наблюдения облучается собственным передатчиком, в разнесенной системе радиолокации использующей сторонние источники в качестве зондирующих сигналов, собственный передатчик отсутствует. Вместо этого производится прием сигналов сторонних передатчиков, после их отражения от метеорных следов. Для таких систем радиолокации с использованием сторонних источников радиоизлучения требуется разработка алгоритмов обработки под конкретный вид принимаемого сигнала с учетом его особенностей и внутренней структуры.

В телевизионном сигнале требованию детерминированности удовлетворяют неинформационные сигналы – гасящие и синхронизирующие импульсы [1]. В отличие от кадровых, строчные синхроимпульсы (ССИ) и строчные гасящие импульсы (СГИ) обладают большей частотой повторения (15625Гц), что позволяет получить более подробную структуру амплитудно-временную характеристику (АВХ) отраженного сигнала. Так как амплитуда первой гармоники последовательности прямоугольных импульсов пропорциональна амплитуде импульса, то для получения АВХ сигналов отраженных от метеорных следов достаточно измерять только амплитуду первой гармоники.

Функциональная схема измерителя амплитуды на основе узкополосной фильтрации гармоники СГИ изображена на рис. 1.

Методика обработки основывается на гармоническом анализе. Сигнал с выхода приемника оцифровывается и с помощью быстрого преобразования Фурье выделяется гармоника на частоте 15625 Гц соответствующая

3. Многопозиционная система разнесенной радиолокации метеоров

Для определения радианта индивидуальных метеоров применяют многопозиционные радиолокационные системы. Принцип определения координат в этих системах основывается на измерении времени прихода сигнала, отраженного от разных зеркальных точек на следе, в разнесенные приемные пункты.

Рассмотрим многопозиционную разнесенную метеорную радиолокационную систему (МРМРЛС) определения параметров орбит индивидуальных метеоров (рис. 2). Здесь Т – передающий телевизионный центр; приемное устройство МРМРЛС состоит из трех пунктов: основного О и двух выносных – А и В; M_0, M_1, M_2 – точки зеркального отражения на метеорном следе.

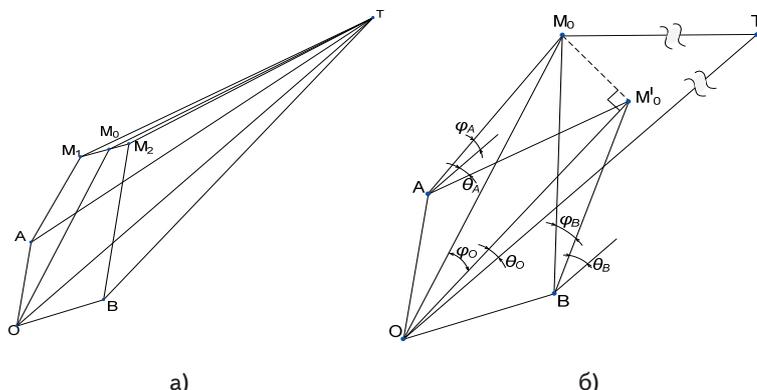


Рис. 2. Многопозиционная разнесенная метеорная радиолокационная система

За основу МРМРЛС был принят комплекс МАРС в котором пункты О и Т находятся в одной точке.

Для вычисления азимута а радианта метеора по результатам радиолокационных наблюдений импуль-

сно-дифракционным методом пользуются следующими формулами [2]:

$$\operatorname{tga}' = \frac{\Delta t_B \cos \varphi_A - \Delta t_A \frac{O_B}{O_A} \cos \varphi_B}{\Delta t_B \sin \varphi_A + \Delta t_A \frac{O_B}{O_A} \sin \varphi_B}, \quad (5)$$

где Δt_A и Δt_B – временные сдвиги дифракционных картин выносных пунктов А и В относительно основного пункта О;

O_A и O_B – расстояния ОА и ОВ;

φ_A и φ_B – углы между направлением из основного пункта на точку севера и базами ОА и ОВ.

Квадрант азимута определяется знаками величин Δt_A и Δt_B :

$$\left. \begin{matrix} \Delta t_A \geq 0 \\ \Delta t_B \geq 0 \end{matrix} \right\} a = a' + \pi \quad \text{при } a' > 0 \quad \left. \begin{matrix} \Delta t_A \geq 0 \\ \Delta t_B \geq 0 \end{matrix} \right\} a = a' + \pi \quad \text{при } a' < 0$$

$$\left. \begin{matrix} \Delta t_A \leq 0 \\ \Delta t_B \leq 0 \end{matrix} \right\} a = a' \quad \text{при } a' > 0 \quad \left. \begin{matrix} \Delta t_A \leq 0 \\ \Delta t_B \leq 0 \end{matrix} \right\} a = a' \quad \text{при } a' < 0$$

$$\left. \begin{matrix} \Delta t_A \geq 0 \\ \Delta t_B \leq 0 \end{matrix} \right\} a = a' \quad \text{при } a' > 0 \quad \left. \begin{matrix} \Delta t_A \geq 0 \\ \Delta t_B \leq 0 \end{matrix} \right\} a = a' + \pi \quad \text{при } a' < 0. \quad (6)$$

$$\left. \begin{matrix} \Delta t_A \leq 0 \\ \Delta t_B \geq 0 \end{matrix} \right\} a = a' + \pi \quad \text{при } a' > 0 \quad \left. \begin{matrix} \Delta t_A \leq 0 \\ \Delta t_B \geq 0 \end{matrix} \right\} a = a' \quad \text{при } a' < 0$$

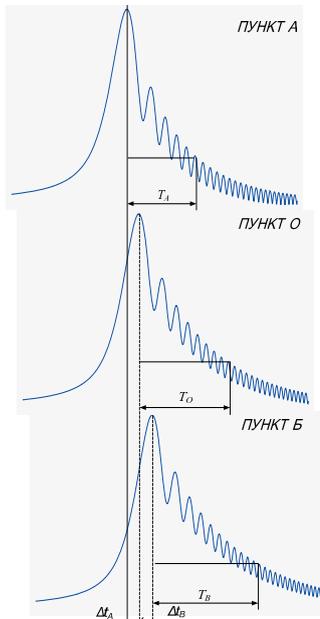


Рис. 3. АВХ сигналов в разнесенных пунктах

Временные сдвиги Δt_A и Δt_B вычисляются следующим образом:

$$\Delta t_A = \frac{1}{n_{OA}} \sum_i (N_{Oi} - N_{Ai}), \quad (7)$$

где N_{Oi} и N_{Ai} – положение экстремумов дифракционных картин пунктов О и А соответственно; n_{OA} – число пар одноименных экстремумов, положение которых измерено.

Аналогично определяется величина Δt_B .

Выражение для ошибок определения азимута радианта имеют вид:

$$(\sigma a)^2 = \frac{4v_0^2 \sigma^2(\Delta t)}{O_A^2 O_B^2 \sin^2(Z) \sin^2(\varphi_A + \varphi_B)} \times \left[O_A^2 \cos^2(A + \varphi_A) + O_B^2 \cos^2(A - \varphi_B) \right], \quad (8)$$

где $\sigma(\Delta t)$ – среднеквадратичная ошибка измерения временных сдвигов,

Z – зенитное расстояние радианта метеора.

Если базы равны и взаимно перпендикулярны то σa не зависит от a , следовательно:

$$\sigma a = \frac{2v_0 \sigma(\Delta t)}{O_A \sin(Z)}. \quad (9)$$

Для вычисления зенитного расстояния Z используют следующие соотношения:

$$\sin(Z_A) = -\frac{2v_0 \Delta t_A}{O_A \cos(A + \varphi_A)}, \quad \text{и}$$

$$\sin(Z_B) = -\frac{2v_0 \Delta t_B}{O_B \cos(A - \varphi_B)}, \quad (10)$$

где v_0 – видимая скорость метеорного тела, рассчитывается по выражению:

$$\vartheta_0 = \sqrt{\frac{\lambda R_1 R_2}{(R_1 + R_2)(1 - \sin^2(\psi) \cos^2(\beta))}} \frac{V_i - V_j}{2(t_i - t_j)}. \quad (11)$$

Как видно из выражения (11) для определения скорости необходимо знать ориентацию следа, поэтому для вычисления скорости можно воспользоваться следующим выражением [2]:

$$\vartheta_0 = \frac{O_B \sqrt{O_B^2 - (R_A - R_O)^2 - (R_B - R_O)^2}}{2\Delta t_B \sqrt{O_B^2 \left[\frac{\Delta t_A}{\Delta t_B} + 1 - \left(\frac{\Delta t_A}{\Delta t_B} (R_B - R_O) - (R_A - R_O) \right)^2 \right]}}$$

$$\vartheta_0 = \frac{\sqrt{O_B^2 - C^2 (\Delta t_A^2 - \Delta t_B^2)}}{2\Delta t_B \sqrt{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_B} + 1}} \quad (12)$$

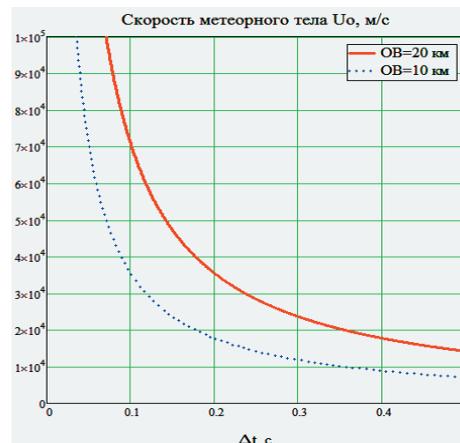


Рис. 4. Зависимость временных сдвигов АВХ от скорости метеора

На рис. 4 показан диапазон изменения временных сдвигов дифракционных картин для случая, когда $\Delta t_A = \Delta t_B$ при двух длинах баз ОБ.

Из рис. 4 видно, что временные сдвиги находятся в диапазоне от 0,05 сек. до 0,4 сек. Поэтому их измерение является вполне реализуемой задачей.

4. Погрешность определения координат радианта индивидуальных метеоров по сигналам ТВ-вещания

Для определения погрешности определения угловых координат радианта индивидуальных метеоров было проведено численное моделирование с длиной выборки 4096 значений. По умолчанию приняты следующие параметры:

- длина базы ОА=ОБ=6км,
- угол между ОА и ОБ равен 90 град,
- скорость метеорного тела 40км/с,
- зенитное расстояние радианта 45° .

Моделированию проводилось для различных значений c/σ на выходе обнаружителя (рис. 5).

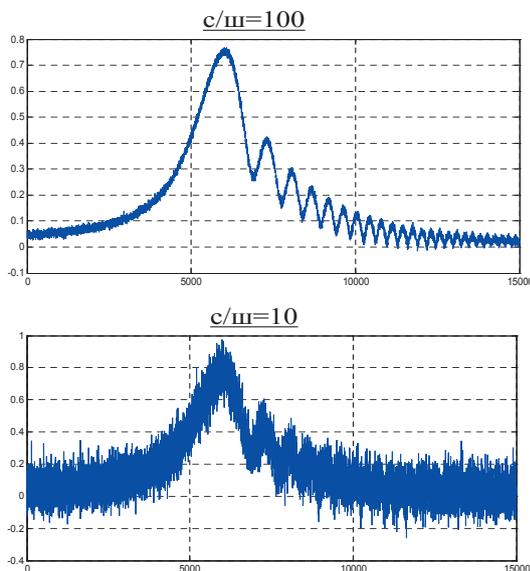


Рис. 5. АВХ сигнала при разном c/σ

На рис. 6 показана зависимость погрешности определения азимута радианта от отношения сигнал/шум для различных вариантов вторичной обработки:

- без вторичной обработки
- после вторичной обработки.

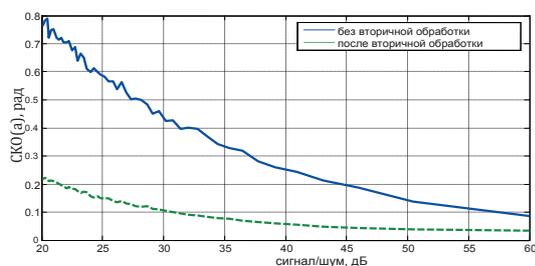


Рис. 6. Зависимость погрешности определения азимута радианта от отношения сигнал/шум для различных вариантов вторичной обработки

5. Замечаемость метеоров

Наблюдения метеоров радиометодом являются косвенными, то есть информацию о физических и динамических параметрах метеорных тел получают путем обработки радиолокационных сигналов, являющихся результатом взаимодействия метеороидов с атмосферой Земли. Очевидно, что при этом доступны наблюдениям только те метеоры, метеороиды которых движутся по орбитам, пересекающимся с орбитой Земли. Но и для них различия в условиях встречи с Землей обуславливают резкое отличие наблюдаемых свойств метеоров.

Отличие видимых распределений динамических параметров метеороидов в атмосфере Земли от истинных распределений в околоземном пространстве определяется тремя факторами: во-первых, движение и притяжение Земли определяют вероятность встречи метеорных тел с Землей от параметров орбит, по которым они движутся, – астрономический фактор селекции. Во-вторых, характер наблюдений определяет вероятность регистрации метеорных тел с различными координатами радианта – геометрический фактор селекции. В-третьих, различная геоцентрическая скорость, с которой метеорные тела влетают в земную атмосферу, определяет вероятность регистрации наземными методами наблюдения метеорного тела с данной скоростью – физический фактор селекции.

Из всех факторов селективности, перечисленных выше, наиболее важным при радиолокационных наблюдениях является физический. Важность физического фактора селективности (замечаемости) радиометеоров определяется тем, что она характеризует не только сам метеорный след в атмосфере Земли, но и сигнал, отраженный от этого следа.

Физический фактор замечаемости определяет относительное количество регистрируемых на РЛС метеоров с данными внеатмосферной скоростью v_∞ , зенитным расстоянием радианта Z и массой M_0 .

Методика расчета физического фактора замечаемости для совмещенной метеорной РЛС разработана в [2-4] и заключается в вычислении интеграла:

$$P_\phi = \int_0^\infty l(\alpha_{эф}^{min}) \frac{1}{M_0^s} dM_0, \quad (13)$$

где l_0 – некоторая средняя длина метеорных следов; M_0 – масса метеороида; s – некоторая постоянная, значение которой изменяется для различных интервалов масс метеороидов; $l(\alpha_{эф}^{min})$ – длина участка метеорного следа, на котором эффективная электронная плотность больше порога чувствительности; $\alpha_{эф}^{min}$ – минимального значения электронной плотности, при котором могут быть обнаружены следы данной РЛС в направлении максимального излучения.

Величину порога чувствительности $\alpha_{эф}^{min}$ можно оценить по формуле:

$$\alpha_{эф}^{min} = \sqrt{\frac{32\pi^2 P_{Rmin} R^3}{\lambda^3 P_T G_T G_R}} \left(\frac{mc^2}{e^2} \right), \quad (14)$$

где P_T – мощность радиопередающего устройства; P_{Rmin} – минимальная мощность отраженного сигнала,

регистрируемого радиоприемным устройством; G_T и G_R – коэффициент направленного действия передающей и приемной антенн; λ – рабочая длина волны РЛС; e и m – заряд и масса электрона; c – скорость света; R – расстояние от точки отражения на метеорном следе до РЛС.

Эффективная линейная электронная плотность $\alpha_{эф}$ вдоль метеорного следа рассчитывается по выражению:

$$\alpha_{эф} = \alpha \frac{1 - \exp\left(8\pi^2 \cdot D \cdot v_{\infty}^{-1} \cdot \sqrt{2R \cdot \lambda^{-3}}\right)}{8\pi^2 \cdot D \cdot v_{\infty}^{-1} \cdot \sqrt{2R \cdot \lambda^{-3}}} \exp\left[-\frac{4\pi^2 r_0^2}{\lambda^2}\right], \quad (15)$$

где α – линейная электронная плотность вдоль метеорного следа; r_0 – начальный радиус метеорного следа; D – коэффициент амбиполярной диффузии.

$$\alpha = \beta \sqrt[3]{v_{\infty}^2 M_0^2 \delta^{-2}} \frac{\rho \Lambda A}{2\mu m_H Q} \left(1 - \frac{1}{6} \frac{\rho \Lambda A H \sqrt[3]{v_{\infty}^2}}{Q M_0 \cos(Z) \sqrt[3]{M_0 \delta^2}}\right)^2, \quad (16)$$

Электронную плотность можно рассчитать по формуле:

где β – коэффициент ионизации; δ – плотность метеороида; ρ – плотность атмосферы на высоте h ; Λ – коэффициент теплопередачи; A – коэффициент формы; μ – средний атомный вес метеорного вещества; m_H – масса атома водорода; H – высота однородной атмосферы; Q – энергия испарения 1 г метеорного вещества.

Совокупность моделей коэффициента ионизации, коэффициента амбиполярной диффузии, начального радиуса метеорного следа и высоты однородной атмосферы может быть получена из [3]:

$$\begin{cases} \beta = 3.0893 \cdot 10^{-6} (v_{\infty} - 8.13)^3 \\ D = \exp(0.108h - 7.842) \\ r_0 = 0.109 v_{\infty}^{0.65} \exp\left[\frac{h - 95}{H}\right] \\ H = 46.8273 - 0.95h + 0.0055h^2 \end{cases} \quad (17)$$

В случае разнесенной метеорной РЛС мощность сигнала, отраженного от метеорного следа будет зависеть как от параметров передающей и приемной станций, так и от геометрии расположения метеорного следа в пространстве [5]. Следовательно, выражения для порога чувствительности и эффективной линейной электронной плотности вдоль метеорного следа принимают следующий вид:

$$\alpha_{эф}^{min} = \sqrt{\frac{16\pi^2 P_{Rmin} R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta))}{\lambda^3 P_T G_T G_R \sin^2(\gamma)}} \left(\frac{mc^2}{e^2}\right), \quad (18)$$

$$\alpha_{эф} = \alpha \frac{1 - \exp\left[-\frac{256\pi^4 D^2 v_{\infty}^{-2} R_T R_R \cos^2(\phi)}{\lambda^3 (R_T + R_R) (1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta))}\right]}{\sqrt{\frac{256\pi^4 D^2 v_{\infty}^{-2} R_T R_R \cos^2(\phi)}{\lambda^3 (R_T + R_R) (1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta))}}} \exp\left[-\frac{4\pi^2 r_0^2}{\lambda^2} \cos^2(\phi)\right], \quad (19)$$

где R_T и R_R – дальности от точки отражения до радиопередающего и радиоприемного устройств соответственно; углы ϕ и β определяют ориентацию метеорного следа в пространстве; γ – угол между электрическим вектором падающей волны и лучом зрения на приемник.

Из анализа выражения (18) следует, что значение $\alpha_{эф}^{min}$ в случае разнесенной метеорной РЛС может уменьшиться довольно значительно относительно значения порога чувствительности для совмещенной метеорной РЛС.

Чтобы оценить данный вывод количественно, рассчитаем коэффициент q , равный отношению порогов чувствительности для разнесенной и совмещенной метеорной РЛС:

Как видно из уравнения (20), значение коэффициента q можно считать функцией трех параметров – углов ϕ , β и γ .

Угол γ характеризует поляризационные свойства передающей и приемной антенн и в случае недоуплотненных метеорных следов считается, что поляризация отраженных сигналов не изменяется.

$$q = \frac{(\alpha_{эф}^{min})_{РАЗН}}{(\alpha_{эф}^{min})_{СОВМ}} = \frac{\sqrt{\frac{16\pi^2 P_{Rmin} R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta))}{\lambda^3 P_T G_T G_R \sin^2(\gamma)}} \left(\frac{mc^2}{e^2}\right)}{\sqrt{\frac{32\pi^2 P_{Rmin} R^3}{\lambda^3 P_T G_T G_R}} \left(\frac{mc^2}{e^2}\right)} = \frac{\sqrt{R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta))}}{2R^3 \sin^2(\gamma)} \approx \sqrt{\frac{1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\gamma)}} \quad (20)$$

Следовательно, поляризационные соотношения передающей и приемной антенн можно с высокой степенью точности считать только аппаратным эффектом, причем для анализа можно принять $k_a = \sin(\gamma) \approx 1$ [6].

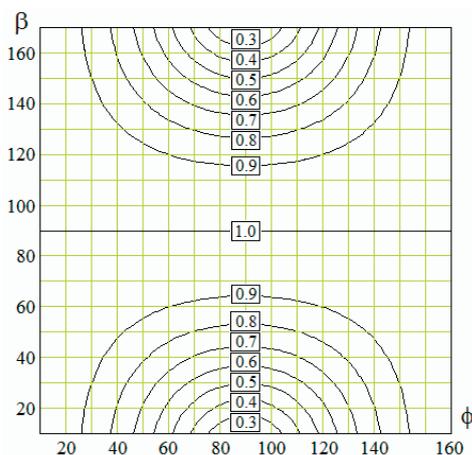
Последнее позволяет сделать вывод: отличия в значениях порогов чувствительности для разнесенной и совмещенной метеорных РЛС определяются только геометрией расположения метеорного следа в пространстве, т.е.:

$$q(\phi, \beta) = \frac{(\alpha_{эф}^{min})_{РАЗН}}{(\alpha_{эф}^{min})_{СОВМ}} \approx \sqrt{1 - \sin^2(\phi) \cos^2(\beta)}. \quad (21)$$

На рис. 7 приведен контурный график зависимости $q(\phi, \beta)$.

Как следует из анализа приведенного графика, значение порога чувствительности $(\alpha_{эф}^{min})_{РАЗН}$ всегда меньше значения $(\alpha_{эф}^{min})_{СОВМ}$ и только в некоторой области (ϕ и β близки к 90° , что соответствует случаю совмещенной РЛС) достигает значения $(\alpha_{эф}^{min})_{СОВМ}$.

Следовательно, теоретический предел обнаружения метеоров с данной скоростью возрастает. Последнее при использовании достаточно чувствительной аппаратуры позволяет регистрировать более слабые метеоры, а, значит, значительно повысить количество регистрируемых метеоров.

Рис. 7. Зависимость $q(\phi, \beta)$

Второй важный вывод, который можно сделать из анализа выражений (18) и (19) – физический фактор замечаемости также является функцией координат положения метеорного тела в пространстве. Следовательно, путем моделирования можно подобрать такую конфигурацию разнесенной метеорной РЛС, которая обладала бы максимальной замечаемостью для метеоров в заданном диапазоне геоцентрических скоростей, т.е. появляется возможность более тщательного поиска метеорных потоков, где дополнительным критерием является равенство геоцентрических скоростей зарегистрированных метеорных тел.

6. Выводы

Приведенная в данной статье методика позволяет реализовать многопозиционную метеорную радиолокационную станцию исследования распределения метеорного вещества в Солнечной системе с использо-

ванием сигналов телевизионных передатчиков метрового диапазона, что снижает финансовые затраты на проведение исследований, не нарушает экологическую обстановку и не требует дополнительного частотного ресурса.

Рассчитана СКО определения азимута радианта метеорного следа, которая при отношении сигнал/шум на входе обнаружителя 30дБ составляет 0,1 рад.

Получена зависимость физического фактора замечаемости от параметров метеорного следа и разнесенной системы радиолокации.

Литература

1. Джакония В.Е. Телевидение: Учебник для ВУЗов. М.: Радио и связь, 1997. – 640с.
2. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. – М.: Наука, 1967. – 260 с.
3. Горелов Д.Ю. Исследование физического фактора замечаемости / Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 143. – С. 215–222.
4. Мак-Кинли Д. Методы метеорной астрономии. – М.: Мир, 1964. – 384 с.
5. Yrjola I., Jenniskens P., 1998, Meteor Stream Activity VI. A survey of annual stream activity by means of forward meteor scatter, *Astronomy & Astrophysics* 330, 739–752.
6. Костылев К.В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. – Казань: Изд-во КГУ. 1970. – 142 с.