УДК 621.396.96

И. Е. АНТИПОВ, д-р техн. наук, А. А. КОСТЫРЯ, канд. техн. наук, А. И. ШКАРЛЕТ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ В МЕТЕОРНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В статье рассматривается возможность использования высоких частот для метеорных радиолокационных наблюдений и перспективы, которые открываются в этом случае.

Как известно [1], отражённый от метеорного следа сигнал несёт в себе разнообразную информацию о свойствах метеорных частиц и атмосферы. Он позволяет определить характеристики метеорного радиоканала связи, скорость движения частицы в верхних слоях атмосферы, скорость дрейфа метеорного следа и т. д.

На основании зависимости мощности сигнала, отражённого от метеорного следа от частоты [2]

$$P \sim \frac{1}{f^{2,4}}, \qquad (1)$$

можно заключить, что с её повышением заметно ухудшаются условия радиолокации метеорных отражений.

На рис. 1 схематично показаны примеры применения различных частот в диапазоне 20 – 60 *МГц*, так или иначе использующих отражение от метеорных следов.

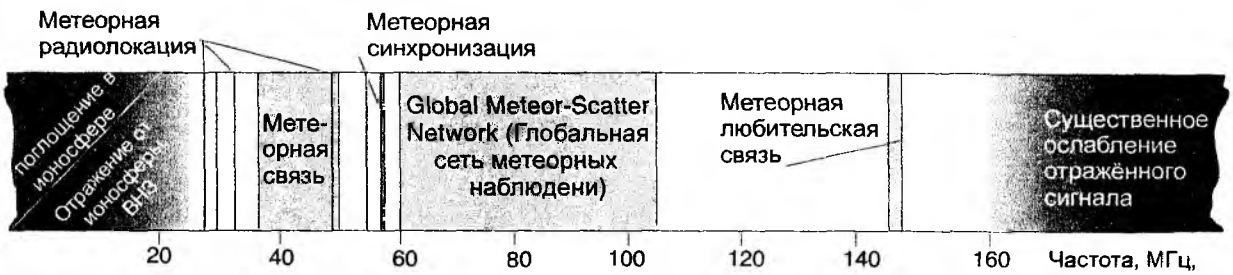

Рис. 1

Снизу этот диапазон ограничен отражениями радиоволн от ионосферы. Это явление используется для дальнего распространения коротких волн, но для метеорной радиолокации интенсивный сигнал, отражённый от ионосферы, представляет собой помеху. Критическая частота максимума ионизации, как правило, не превышает 11 – 13 *МГц*, а при наклонном зондировании наблюдаются отражения от ионосферы на частотах вплоть до 30 – 35 *МГц*.

Учитывая изложенное и исходя из того, что отражение от метеорных следов наиболее эффективно на метровых волнах, следует отметить, что большинство существующих метеорных радаров работают в метровом диапазоне волн. Например, система МАРС (Харьков, ХНУРЭ) – 31,1 *МГц*; радиокомплекс ВЕТА (Харьков, ХНУРЭ) – 36,9 *МГц*; радиолокационный автоматизированный комплекс КГУ-М5 (Казань) – 32,5 *МГц*; SkiYMET; Индийский космический центр Vikram Sarabhai – 32,25 *МГц*; RISH, (Университет Киото, Япония) – 46,5 *МГц* [1].

Однако по многолетнему опыту метеорных наблюдений в Балаклейском геофизическом комплексе Харьковского национального университета радиоэлектроники (БГК ХНУРЭ) на частотах 30 – 36 *МГц*, чаще всего летом, в дневное время фиксировался значительный уровень помех, обусловленный сигналами возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ). Это явление может объясняться повышенной активностью Солнца.

Что касается максимально применимой частоты, то здесь чёткой границы нет. По мере увеличения частоты уровень отражённого сигнала уменьшается в соответствии с (1), но не исчезает полностью. Так, Глобальная сеть метеорных наблюдений использует ТВ и радиовещательные станции, работающие на частотах до 100 – 120 *МГц* [3], а радиолюбители осуществляют связь через метеоры даже на частоте 144 *МГц*.

В разное время были опубликованы данные о попытках метеорных исследований на ещё более высоких частотах: в 1964 г. на частоте 300 *МГц* Гринхау и Уоткинс [5], в 1965, 1966 г. Эванс на частоте 440 *МГц* [5]. Интерес к метеорным исследованиям радарами некогерентного рассеяния большой мощности и с большой апертурой (HPLA) проявили Philip J. Erickson (радар Миллстоуон, частота 440 *МГц*) [6]. Почти одновременно метеорные наблюдения проводились на Джикамарка (Chapin и Kudeki, 1994, 1994) [7] и в Аресибо (Zhou и др., 1995 [5]).

Рассмотрим, какие преимущества даёт использование более высоких частот.

Во-первых, при повышении рабочей частоты существенно снижается уровень помех. Как следует из [4], при повышении частоты в 5 раз (от 30 до 150 *МГц*), уровень промышленных помех, которые являются определяющими в этом диапазоне частот, снижается также в пять раз. Уровень космических и атмосферных помех тоже уменьшается [4].

Во-вторых, для более высоких частот менее вероятно сверхдальнее распространение, связанное с ионосферными и тропосферными аномалиями. Это снижает возможные нерегулярные помехи от удалённых радиоэлектронных средств.

В третьих, чем выше частота, тем меньше размеры антенн, меньше базы и расстояния между элементами фазированных антенных решёток. Это удешевляет конструкции и при необходимости повышает мобильность комплексов.

В четвёртых, при использовании более коротких волн уменьшаются размеры зон Френеля, формируемых на метеорном следе. Как известно, основной вклад в величину принимаемого сигнала вносит участок метеорного следа, находящийся на таком расстоянии r от точки касания, в пределах которого разность хода лучей не превышает половины длины волны λ, т. е., первая зона Френеля, размеры которой описываются выражением

$$L_F \approx \sqrt{r\lambda}\,. \qquad (2)$$

Типичная волнообразная картина амплитудно-временной характеристики (АВХ), наблюдаемая при метеорной локации, которая связана с последовательным включением в процесс отражения нечётных и чётных зон Френеля, позволяет определить скорость метеорной частицы [2]. Уменьшение размеров зон Френеля позволит точнее определять максимумы и минимумы и, соответственно, снизить погрешность в определении скорости.

Кроме того, на более высоких частотах появляется возможность наблюдать ещё одно интересное метеорное явление – так называемое головное эхо. Это своеобразный «сгусток ионизации», как назвали его П. Миллман и Д. Мак-Кинли, одни из первых обнаружившие это явление. Источник головного эха движется вместе с метеором. Миллман и Мак-Кинли полагали, что причиной его образования является мощное ультрафиолетовое излучение ударной волны, создаваемой метеорным телом. Другие исследователи объяснили это явление тем, что при определенных условиях перед метеорной частицей образуется так называемый слой взаимодействия, в котором происходит взаимодействие отраженных, испаряющихся и набегающих молекул. В любом случае, головное эхо метеора представляет значительный научный интерес. Например, наблюдаемые отражения от головного эхо метеора с помощью радара обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико (430 *МГц*) позволяют измерять скорость метеора, пересекающего главный и боковые лепестки диаграммы направленности (ДН) антенной системы. По утверждению [5], процедура очень чувствительна к форме ДН.

Среди путей совершенствования средств и методов метеорных радиолокационных наблюдений, которые в перспективе позволят поставить БГК ХНУРЭ в один ряд с ведущими научными центрами по изучению метеорных явлений, такими как Аресибо, Миллстоун и др. (рис. 2), был предусмотрен анализ возможности работы на более высоких частотах и на нескольких различных частотах одновременно [1].

Для решения вопроса о целесообразности исследования метеорных явлений на частотах 100 – 160 *МГц* осенью 2011 г. в БГК ХНУРЭ были проведены экспериментальные исследования.

Поскольку в распоряжении БГК ХНУРЭ пока нет достаточно мощного передатчика, работающего в указанном диапазоне частот, было решено воспользоваться излучением передатчика исследовательского комплекса Национального технического университета «ХПИ». Комплекс располагает действующим радаром некогерентного рассеяния, имеющим значительный энергетический потенциал.

Рис. 2

Передатчик ионосферной обсерватории расположен близ г. Змиёв Харьковской области на расстоянии около 50 *км* от БГК ХНУРЭ. Он обладает следующими характеристиками:
- рабочая частота 158 ± 3 *МГц*;
- мощность в импульсе ~3 *МВт*;
- частота зондирующих импульсов 24,4 *Гц*;
- длительность зондирующих импульсов 840, 80 – 150 *мкс* [8];
- направление излучения – вертикально вверх, ширина ДН главного лепестка 2^0.

Форма и уровень боковых лепестков ДН передающей антенны неизвестны, однако их наличие бесспорно.

В качестве приёмника использовался ICOM PCR-100, работающий в режиме АМ с полосой пропускания 50 *кГц*. Для компенсации затухания в кабеле был установлен дополнительный антенный усилитель. Приём осуществлялся на пятиэлементную антенну «волновой канал». В ходе эксперимента опробованы различные направления ориентации антенны.

В первом случае антенна была установлена так, чтобы обеспечить перекрытие ДН, показанное на рис. 3. Вертикальный и горизонтальный масштабы на рис. 3 одинаковы, что позволяет судить о форме и величине исследуемого объёма. Это усечённый конус (почти цилиндр) высотой около 30 и диаметром около 4 *км*. Наблюдаемая численность была невелика, всего 5 – 7 метеоров час, что объясняется узостью зоны перекрытия ДН.

Во втором случае приёмная антенна в БГК была развёрнута в противоположную от Змиёва сторону, что позволяло принимать сигналы, обусловленные боковыми лепестками ДН передающей антенны (форма которых неизвестна). В этом случае численность была значительно больше.

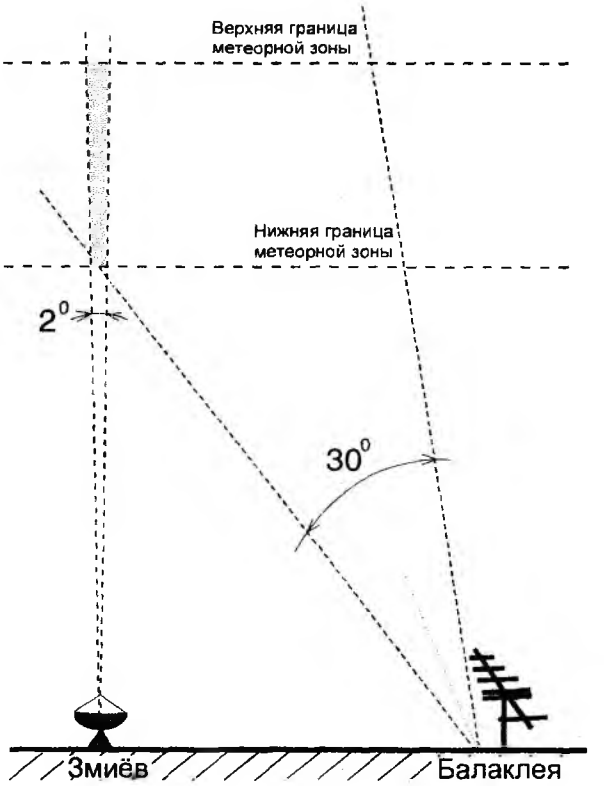

Рис. 3

Регистрация осуществлялась цифровым осциллографом, синхронизация которого осуществлялась сигналом того же передатчика, принимаемого земным лучом, поэтому задержка на осциллограммах (рис. 4) соответствует разности времени распространения радиоволн между Змиёвым и БГК через метеорный след и напрямую (50 *км*).

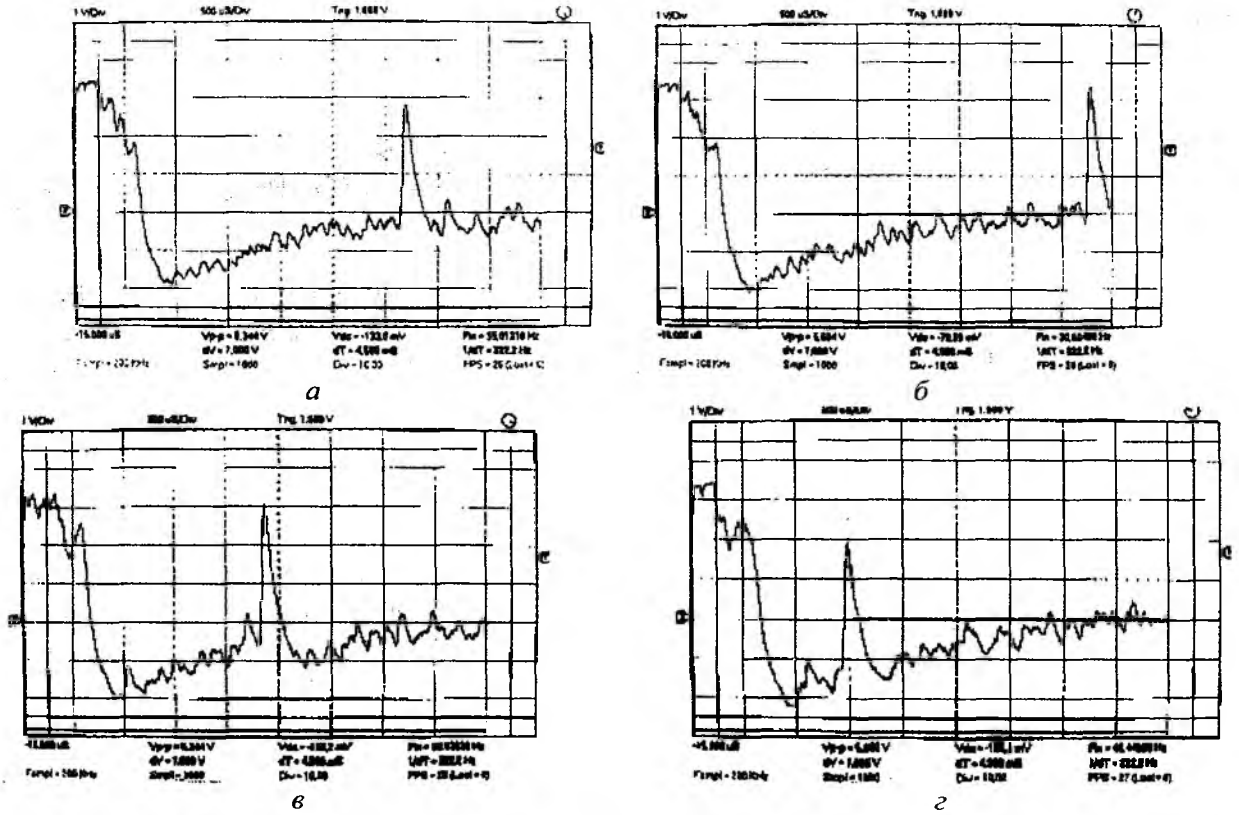

Рис. 4

В течение всего времени эксперимента, несмотря на неоптимальный с точки зрения сигнала приёмник, наблюдались и фиксировались радиоотражения на разных дальностях.

Таким образом, проведённый эксперимент позволил сделать следующие выводы.

1. Уровень помех существенно меньше, чем на низких частотах, никаких аномальных явлений, препятствующих наблюдениям, также зафиксировано не было.

2. Численность метеорных отражений существенно меньше, чем, например, на частоте 31,5 *МГц*, что полностью соответствует зависимости (1).

3. Характерной особенностью наблюдавшихся отражений была их малая длительность, в редких случаях превышавшая 80 *мс* (два периода зондирования). Это позволяет предположить, что наблюдались отражения не только от метеорного следа (которое должно составлять несколько сотен миллисекунд), но и от головного эха.

Поэтому продолжение наблюдений на частоте 158 *МГц* следует считать целесообразным.

Список литературы: 1. *Антипов, И. Е., Костыря, А. А., Шкарлет, И. А.* Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований // Радиотехника : Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2010. – Вып. 160. – С. 39-46. 2. *Кащеев, Б. Л., Бондарь, Б. Г.* Метеорная связь. – Киев : УМК ВО, 1989. – 76с. 3. *Антипов, И. Е.* Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации : Дис... д-ра. техн. наук. – Харьков, 2007. – 306 с. 4. *Справочник* по радиовещанию / Под общ. ред. А. В. Выходца. – Киев : Техніка, 1981. 5. http://www.imo/net/radio/reflection. 6. *Pellinen-Wannberg, A.* and G. Wannberg: Meteor observations with the European incoherent scatter UHF radar, J. Geophys. Res, 99, 11,379-11,390, 1994. 7. *Chapin, E.* and *Kudeki, E.* (1994). Radar interferometric imaging studies of long-duration meteor echoes observed at Jicamarca // Journal of Geophysical Research 99 (A5): doi: 10.1029/93JA03198. ISSN: 0148-0227. 8. *Таран, В. И.* Исследование ионосферы с помощью радаров некогеррентного рассеяния в Харькове // Вестник ХПИ. – 1999. – Вып. 31. – С. 3 – 9.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 12.01.2012